



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES “BUBBLEDECK” E LAJES LISAS

Yuri Mariano de Oliveira Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de  
Engenharia Civil da Escola Politécnica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte  
dos requisitos necessários à obtenção do título de  
Engenheiro.

Orientador:

Henrique Innecco Longo

Rio de Janeiro – RJ - Brasil

Setembro de 2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**Curso de Engenharia Civil**  
**Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas**



**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES “BUBBLEDECK” E LAJES LISAS**

Yuri Mariano de Oliveira Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO APRESENTADO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE MECÂNICA APLICADA E ESTRUTURAS DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

---

Henrique Innecco Longo  
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ  
(Orientador)

---

Fernando Celso Uchôa Cavalcanti  
Prof. Adjunto, M.Sc., EP/UFRJ

---

Francisco José Costa Reis  
Prof. Assistente, M.Sc., EP/UFRJ

Rio de Janeiro – RJ - Brasil  
Setembro de 2011

Silva, Yuri Mariano de Oliveira

Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes lisas / Yuri Mariano de Oliveira Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2011.

VIII, 54 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Henrique Innecco Longo.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 53.

1. Laje bubbledeck. 2. Laje lisa. 3. Concreto Armado.  
I. Longo, Henrique Innecco. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes lisas.

Yuri Mariano de Oliveira Silva

Setembro/2011

Orientador: Henrique Inecco Longo.

Curso: Engenharia Civil

A tecnologia *bubbledeck* ainda se faz pouco presente em obras no Brasil, mas seu estudo está em desenvolvimento, e empreendedores têm mostrado interesse no emprego da mesma.

Tal tipo de laje inovadora promete consumir um menor volume de concreto armado, economizar fôrma e ainda assim apresentar comportamento estrutural, acústico e térmico superior, ou pelo menos igual, quando comparado à laje lisa tradicional. Porém, ainda não existem normas associadas à tecnologia *bubbledeck*. Por isso, um estudo mais profundo é necessário para a consolidação de seus critérios de dimensionamento e detalhamento.

Este projeto de graduação foi desenvolvido com o âmbito de servir como material didático de apoio para estudos futuros e tem por finalidade comparar a laje tipo *bubbledeck* com a tradicional laje lisa, com o propósito de avaliar as qualidades anteriormente citadas quanto à sua notoriedade.

Inicialmente são apresentadas as características físicas e os conceitos a respeito da nova solução apresentada, que servem como base para o seu dimensionamento. Em seguida é demonstrado o método construtivo da laje *bubbledeck* e sua sequência de execução. Por fim, o dimensionamento dos dois tipos de laje estudados e as taxas de consumo de material.

*Palavras-chave:* Laje *bubbledeck*, Laje lisa, Concreto armado.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Engineer.

Comparative study between “bubbledeck” slabs and flat slabs.

Yuri Mariano de Oliveira Silva

September/2011

Advisor: Henrique Inecco Longo.

Course: Civil Engineering

The bubbleck technology still remains little present in contructions in Brazil, but his study is in development, and entrepreneurs have interest in use it.

This innovative type of slab promisses to consume smalle volume of concrete, save molds and still provide structural behavior, acoustic and termic better, or at least equal, when compared to the traditional flat slab. However, there no forms related to bubbledeck technology, so further study are necessary for the consolidation of design criteria and detailing.

This graduation project was developed with the purpose to serve as didatic material support to future studies and aims to compare the bubbledeck slab type with the tradicional flat slab, for the purpose of assessing the qualities previously mentioned above as to its veracity.

Initially physical characteristics are shown and concepts regarding the new solution presented, wich serve as basis for his design. Then the constructive method of bubbledeck slab is demonstrated and his execution sequence. Lastly, the design of two types of slab in study and the material consumed rates.

*Key words:* Bubbledeck slab, Flat slab, Reinforced concrete.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão do curso de Engenharia Civil e para a realização deste projeto final.

Em especial:

Em primeiro lugar a Deus, por ser sempre meu companheiro fiel e Pai;

A meus pais, meu exemplo a seguir e meu porto seguro;

A meus irmãos Geraldo e Nícollas, pela amizade e auxílio nos momentos em que mais precisei;

Aos meus tios Renato e Andrea, por me ajudarem de forma tão importante na conclusão de minha faculdade;

Ao Professor Henrique Inecco Longo e ao engenheiro Augusto César Freire, pela ajuda, pelo conhecimento transmitido e colaboração neste trabalho;

À minha namorada Mirella, pela confiança, paciência e compreensão.

A todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade, pelo apoio que me foi dado e pela importância que representam em minha vida.

# ÍNDICE

1. Introdução .....	9
2. <i>Bubbledeck</i> e sua história .....	10
3. Principais Conceitos da laje <i>bubbledeck</i> .....	12
3.1 Benefícios primordiais .....	12
3.2 Método construtivo .....	13
3.3 Especificações para dimensionamento .....	17
3.4 Testes de avaliação e relatório resumo .....	18
4. Projeto de um pavimento .....	20
4.1 Laje bubbledeck BD230 .....	21
4.1.1 Carregamentos e Combinações .....	23
4.1.2 Combinação de Carregamentos .....	24
4.1.3 Esforços encontrados .....	25
4.1.4 Flecha máxima .....	27
4.1.5 Armadura inferior do painel .....	28
4.1.6 Armadura superior do painel .....	29
4.1.7 Armadura superior de ligação entre painéis .....	29
4.1.8 Armadura superior sobre os pilares .....	29
4.1.9 Verificação ao puncionamento .....	30
4.2 Laje lisa de 18 cm .....	33
4.2.1 Carregamentos e Combinações .....	33
4.2.2 Esforços encontrados .....	33
4.2.3 Flecha máxima .....	35
4.2.4 Armadura inferior do painel .....	36
4.2.5 Armadura superior do painel .....	37
4.2.6 Armadura superior de ligação entre painéis .....	37
4.2.7 Armadura superior sobre os pilares .....	37
4.2.8 Verificação à punção .....	38
4.3 Laje lisa de 23 cm .....	41
4.3.1 Carregamentos e Combinações .....	41
4.3.2 Esforços encontrados .....	41
4.3.3 Flecha máxima .....	43
4.3.4 Armadura inferior do painel .....	44
4.3.5 Armadura superior do painel .....	45

4.3.6	Armadura superior de ligação entre painéis .....	45
4.3.7	Armadura superior sobre os pilares.....	45
4.3.8	Verificação à punção.....	46
5.	Taxas e Comparativos .....	49
6.	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	51
7.	Referências Bibliográficas .....	53
8.	Anexos.....	54
8.1	Reações de apoio da laje <i>bubbledeck</i> .....	54
8.2	Reações de apoio da laje lisa de 18cm .....	57
8.3	Reações de apoio da laje lisa de 23cm .....	60



## 1. Introdução

Este projeto de graduação tem por objetivo estudar a viabilidade do emprego da laje com tecnologia *bubbledeck*, ainda recente no Brasil, em uma edificação típica. Com intenção também de divulgá-lo como alternativa para soluções em lajes maciças.

Os objetivos do projeto são: dimensionar a laje *bubbledeck* e a laje maciça, com auxílio do programa de análise por elementos finitos SAP2000 [1]; obter e comparar taxas de concreto armado entre as lajes; explicitar os métodos construtivos e apresentar casos reais de obras em lajes *bubbledeck*; escolher qualitativamente a solução mais adequada para o projeto apresentado.

A primeira etapa do projeto consiste na apresentação dos conceitos básicos inerentes às lajes lisas, bem como os da laje *bubbledeck*, seus aspectos e métodos construtivos, principais benefícios e as especificações para o dimensionamento. A segunda parte compreende a modelagem e o dimensionamento estrutural das lajes em questão. Já a terceira parte desenvolve-se em um comparativo quantitativo e qualitativo entre os tipos de laje.

O Capítulo 2 apresenta um breve histórico da laje *bubbledeck* desde a sua criação até os tempos atuais no Brasil e no mundo.

O Capítulo 3 mostra os conceitos básicos de lajes cogumelo, os principais benefícios do emprego de lajes *bubbledeck*, seu método construtivo e um guia para seu dimensionamento.

O Capítulo 4 apresenta o dimensionamento da laje *bubbledeck*, laje lisa de 18cm e laje lisa de 23cm, apresentando o modelo numérico, carregamentos, flechas obtidas, os esforços e o dimensionamento das armaduras principais para cada um dos tipos de laje.

O Capítulo 5 apresenta a taxa de armadura obtida para cada tipo de laje avaliada e as compara juntamente com os esforços máximos, volume de concreto e flecha máxima.

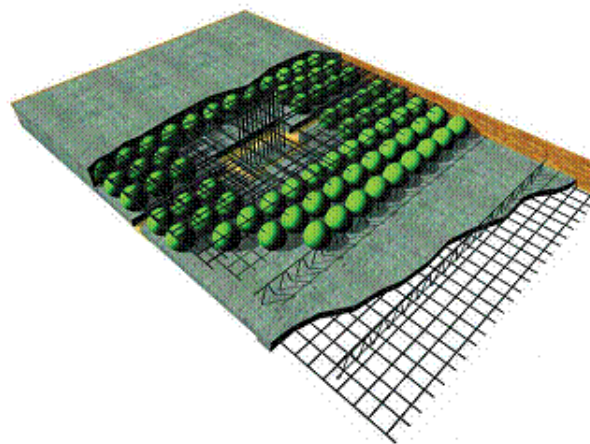
O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2. *Bubbledeck* e sua história

A idéia de se otimizar o uso do concreto, utilizando-o onde efetivamente ele possui função estrutural, não é um conceito novo. Há muito vem sido utilizado o conceito de lajes ocas, empregando o concreto somente em regiões comprimidas, já que o mesmo somente trabalha com baixas tensões à tração e, portanto, usá-lo nessas regiões só resultaria em perdas de material e aumento do peso próprio da estrutura.

Utilizando este conceito, na década de 80, o engenheiro dinamarquês Jorgen Breuning começou a desenvolver as lajes com tecnologia *bubbledeck* durante um concurso nacional criado pelo governo dinamarquês que buscava desenvolver as melhores idéias para uma construção diferenciada para lajes flexíveis que deveriam ser uma melhor solução ecológica, econômica, e aplicáveis em larga escala. Sua idéia foi criar uma laje de concreto com vazios, utilizando-se de esferas plásticas.

A figura 1 apresenta um esquema do posicionamento das bolas no interior da laje caracterizando a *bubbledeck*.



**Figura 1 – Esquema da laje *bubbleck*.** wikipedia [2]

O Millennium Tower, na cidade de Rotterdam na Holanda, foi a primeira obra a ser construída com lajes *bubbuledeck*. Inicialmente, o projeto previa a utilização de lajes ocas tubadas. Porém, antes que fosse iniciada a construção decidiu-se utilizar o conceito de lajes *bubbledeck*, o que resultou em uma aceleração dos ciclos dos andares de 10 para 4 dias. Além disso, significou também uma redução em 50% dos pilares utilizados na obra, e uma economia de quinhentas viagens de caminhão. Foi possível adicionar dois andares a mais devido à diminuição do pé direito, já que a tecnologia não utiliza vigas. Em 2000, quando concluída, a *Millennium Tower* com 149m e 35 andares era a

segunda maior construção da Holanda. A figura 2 mostra a *Millennium Tower* em Rotterdam.



**Figura 2 – Millennium Tower de Rotterdam.** wikipedia [3]

A primeira obra a ser executada utilizando o conceito de lajes *bubbledeck* no Brasil foi a nova sede da empresa Odebrecht na cidade de Salvador, Bahia. Como em Rotterdam, somente após a execução do projeto inicial, a solução em laje *bubbledeck* foi escolhida, quando a empresa resolveu utilizar a tecnologia então recente no Brasil com a finalidade de testá-la. Outros projetos, como o novo Centro Administrativo de Brasília, estão sendo estudados durante a realização deste trabalho e possivelmente receberão lajes *bubbledeck*.

Um estudo comparativo entre as lajes *bubbledeck* e lajes nervuradas foi feito no projeto final de curso de Tamara C. Freire. [4]

### 3. Principais Conceitos da laje *bubbledeck*

#### 3.1 Benefícios primordiais

*BubbleDeck* é usualmente dimensionada com métodos convencionais para lajes maciças, de acordo com a norma alemã DIN 1045 (2001) [9] para construções em concreto armado. Além disso, a solução com lajes *bubbledeck* também se encontra em normas de padronização como a norma britânica EN 13747 (2005) [10].

Segundo LEONHARDT [5], as lajes lisas são lajes armadas em duas direções que se apóiam diretamente sobre pilares, podendo ou não existir um aumento de espessura nas regiões em torno dos pilares, formando os capitéis que dão a forma de “cogumelo” a estas estruturas. Tais lajes devem ter espessura mínima de 15cm e devem ser dimensionadas para momentos no vão e nos apoios (positivos e negativos) em duas direções e também à punção.

A incorporação de esferas de plástico no interior das lajes, substituindo o concreto que não exerce qualquer função estrutural, resulta na diminuição do volume de concreto na laje e por consequência do peso próprio e proporciona mais leveza na estrutura sem perda de função estrutural. Além disso, implica na redução em cerca de 35% do peso próprio das lajes, permitindo a construção de maiores vãos e diminuindo a restrição de sobrecargas.

De acordo com os representantes da tecnologia no Brasil [6], muitos efeitos benéficos podem ser citados para a tecnologia *bubbledeck*, tais como:

- Eliminação de vigas – economia de fôrmas, execução mais barata e rápida de alvenarias e instalações;
- Redução do volume de concreto – 3,5kg do plástico reciclável das esferas substituem 14,31kg de concreto;
- Redução de energia e emissão de carbono – devido a utilização de plástico reciclável, diminuindo o consumo de matérias primas;
- Liberdade nos projetos – layouts flexíveis que facilmente se adaptam a layouts curvos e irregulares.
- Aumento dos vãos nas duas direções – conexão da laje diretamente aos pilares sem nenhuma viga através de concreto *in-situ*;
- Redução do peso próprio – 35% menor, permitindo redução nas fundações;
- Aumento dos inteiros dos pilares – até 50% a mais do que estruturas tradicionais;

### 3.2 Método construtivo

As lajes *bubbledeck* podem ser feitas com o uso de módulos, pré-lajes, ou em painéis acabados.

O primeiro método construtivo citado consiste em posicionar as esferas em gaiolas metálicas, formando módulos sobre fôrmas convencionais de madeira, e então inserir as armaduras adicionais. Neste caso, a concretagem é executada em dois estágios, sendo o primeiro estágio feito com uma espessura de 60mm para evitar a flutuação das bolas no segundo estágio, que preenche a laje por completo. Esse tipo de laje é ideal para obras de reforma, pisos térreos, ou em casos de acesso complicado, pois os módulos podem ser transportados e posicionados manualmente. A figura 3 apresenta o esquema de um módulo *bubbledeck*.



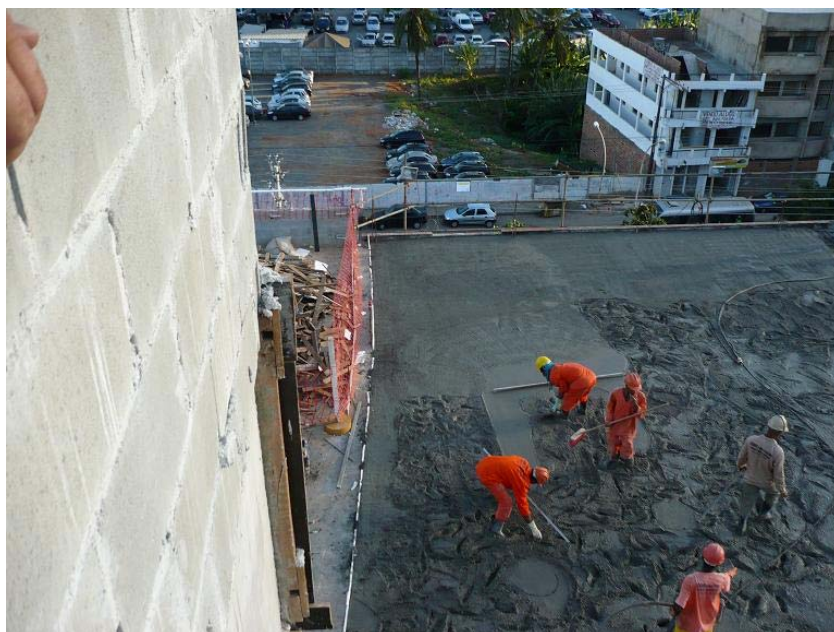
**Figura 3 – Módulo *bubbledeck*. *bubbledeck Brasil* [6]**

A figura 4 apresenta o primeiro estágio de concretagem e a figura 5 apresenta o segundo estágio de concretagem.



**Figura 4 – Primeiro estágio de concretagem da laje *bubbledeck*. *Freire, T.C.* [4]**





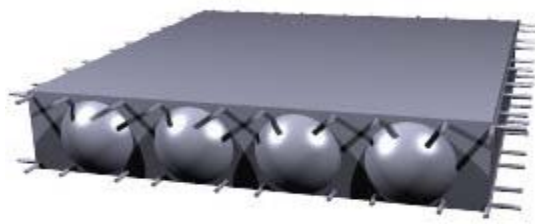
**Figura 5 – Segundo estágio de concretagem da laje *bubbledeck*. Freire, T.C. [4]**

Já o método com pré-laje consiste em utilizar as lajes de 60mm de espessura pré-fabricadas já incorporando os módulos reforçados com as esferas plásticas, de maneira que o assoalho de madeira é eliminado. É o tipo mais comum e necessita de um guindaste móvel para o posicionamento dos elementos pré-moldados devido ao seu peso. A flexibilidade resultante desse método garante aos módulos uma adaptação fácil para qualquer tipo de piso e podem acomodar tubos e partes de instalações. Além disso, podem ser incluídas aberturas, mesmo após a conclusão da laje. A figura 6 apresenta o esquema de uma pré-laje com os módulos *bubbledeck* incorporados.



**Figura 6 – Pré-laje acoplada ao módulo *bubbledeck*. *bubbledeck Brasil* [6]**

Por fim, os painéis acabados são lajes prontas concretadas em fábrica e entregues no local da construção restando fazer apenas o içamento e o posicionamento, não necessitando de concreto de segundo estágio. O painel pronto é aplicável para apoios em uma só direção e necessita da inclusão de vigas suporte ou paredes, pois funcionam da mesma forma que a laje pré-moldada unidirecional. A figura 7 demonstra um painel acabado *bubbledeck*.



**Figura 7 – Painel acabado *bubbledeck*. *bubbledeck Brasil* [6]**

No local final de posicionamento, armaduras em malha são acopladas às malhas superiores e barras de ligações simplesmente posicionadas nas juntas entre os elementos exercem a função de criar a perfeita ligação entre os elementos individuais. Após a colocação das armaduras complementares, a camada final de concreto é despejada e curada, gerando a continuidade estrutural dos diversos elementos e garantindo o projeto de uma laje lisa.

Todo o detalhamento das ligações e especificações pode seguir os critérios de projeto e execução das lajes maciças. A utilização conjunta de outras técnicas de construção também é possível, como por exemplo, o concreto protendido.

Em suma, a sequência de execução usual dos painéis é:

- Escoramento provisório - vigas paralelas espaçadas de 1,8 m a 2,5 m são posicionadas;
- Colocação dos painéis *bubbledeck* - elementos pré-moldados posicionados com o emprego de equipamentos mecânicos;
- Reforços nas juntas - armadura de ligação entre as peças pré-moldadas e armadura de ligação entre as malhas superiores;
- Capitéis - armadura adicional superior na região dos pilares e eventual armadura de reforço;
- Reforço periférico - colocação de armadura no perímetro da laje, caso necessário;
- Preparação - selagem de juntas, limpeza e saturação com água do módulo pré-moldado;
- Concretagem - lançamento, adensamento do concreto de segundo estágio e remoção do escoramento;
- Acabamentos - nenhum trabalho adicional é necessário a menos que se deseje outro tipo de acabamento diferente do concreto aparente

Na figura 8 está apresentada uma seção típica de uma laje *bubbledeck*.

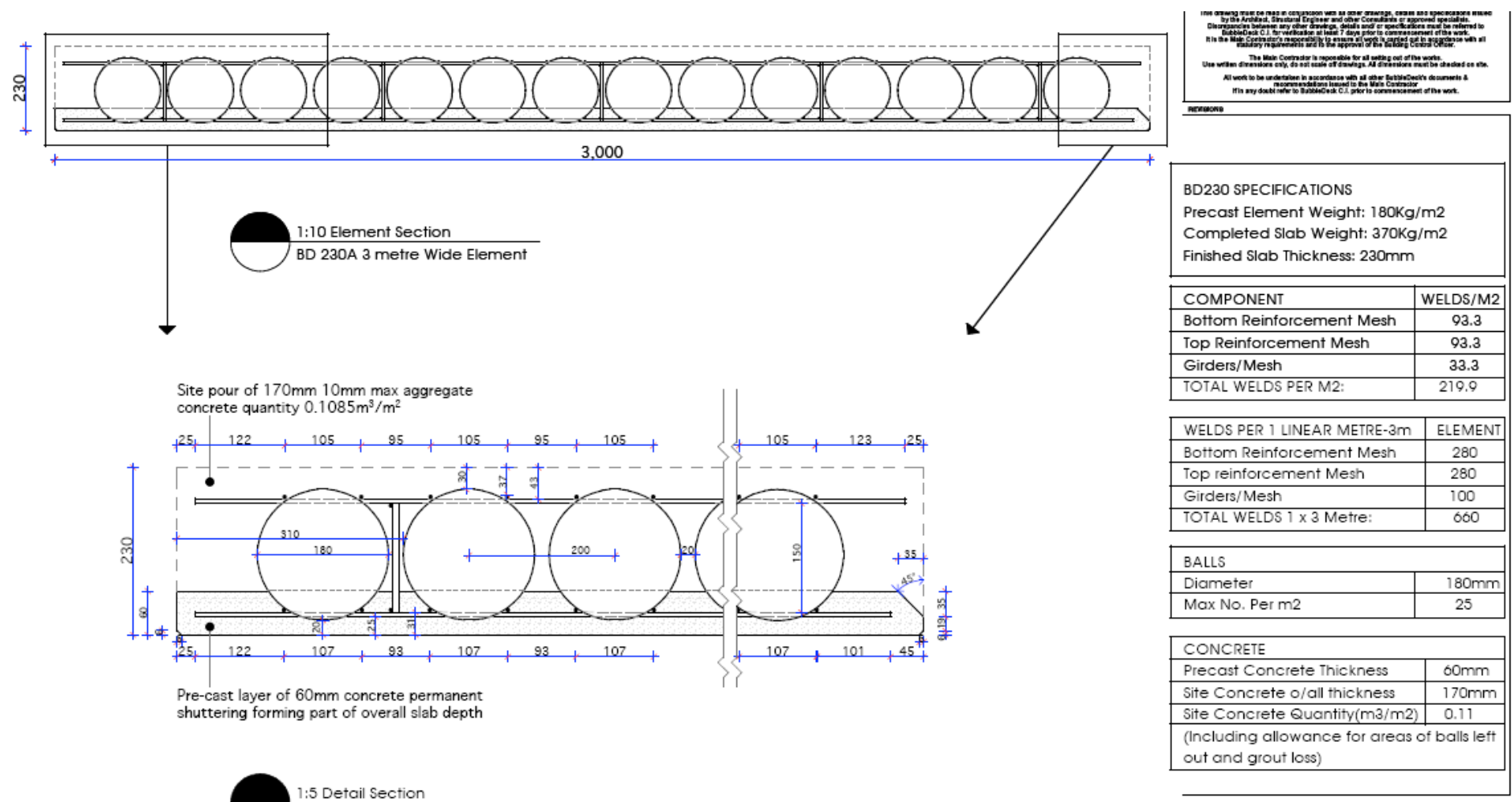


Figura 8 – Módulo básico *bubbledeck* BD230. *bubbledeck* internacional [7]



### 3.3 Especificações para dimensionamento

Para escolha do tipo de laje *bubbledeck* o primeiro critério utilizado é o de limitação de flechas. Portanto, o vão máximo utilizado para cada tipo de laje é determinado pela razão entre o menor comprimento (L) do vão e a espessura (d) da laje (L/d). O fabricante sugere em seu manual [5] as seguintes razões de L/d para os diferentes tipos de vãos:

$$L/d \leq 30 - \text{vãos simples}$$

$$L/d \leq 39 - \text{vãos contínuos}$$

$$L/d \leq 10,5 - \text{balanço}$$

Também de acordo com o vão, a tabela 1 mostra espessura padronizada das lajes *bubbledeck* associada a sua carga permanente equivalente.

**Tabela 1 – Vãos usuais e sua carga permanente equivalente. [4]**

Tipo	Espessura da Laje	Diâmetro das Esferas	Vão	Carga(PP)	Concreto
	[mm]	[mm]	[m]	[kg/m²]	[m³/m²]
<b>BD230</b>	230	φ 180	7 a 10	370	0,10
<b>BD280</b>	280	φ 225	8 a 12	460	0,14
<b>BD340</b>	340	φ 270	9 a 14	550	0,18
<b>BD390</b>	390	φ 315	10 a 16	640	0,20
<b>BD450</b>	450	φ 360	11 a 18	730	0,25

A capacidade de redução de carga das esferas pode variar, assim como seus intereixos, e ambos os fatores dependem da taxa de esferas por metro quadrado na laje. Na tabela 2 são apresentados os diâmetros padronizados das esferas e alguns valores relacionados a cada diâmetro.

**Tabela 2 – Especificações Técnicas. *bubbledeck* internacional [7]**

Diâmetro da Esfera [cm]	18,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
Mínimo Intereixo das Esferas [cm]	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Máximo Número de Esferas [1/m²]	25,00	16,00	11,00	8,16	6,25	4,94	4,00
Espessura Mínima da Laje [cm]	23,00	28,00	34,00	40,00	45,00	52,00	58,00
Redução de Carga Por Esfera [kN]	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
Redução Máx. de Carga /m²[kN/m²]	1,91	2,39	2,86	3,34	3,82	4,29	4,77
Fator para Rigidez [-]	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
Fator para o Cortante [-]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Fator para o Peso [-]	0,67	0,66	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67

### 3.4 Testes de avaliação e relatório resumo

Segundo testes realizados na Holanda, Alemanha e Dinamarca [7], as lajes *bubbledeck* apresentaram melhor resistência ao corte do que o esperado. Experiências mostraram um efeito positivo das esferas no processo de concretagem gerando um efeito similar à adição de aditivos plastificantes. Além disso, também possuem uma melhor distribuição de tensões quando comparadas a outros tipos de lajes com vazios, como as nervuradas. Devido a sua estrutura tri-dimensional e a gradual distribuição das forças, os vazios devido às esferas não terão influências negativas nem causar perdas de capacidade de carga.

Os fatores redutores encontrados experimentalmente [7] que devem ser empregados encontram-se nas tabelas 3 a 5 e na figura 9.

**Tabela 3 – Resultados Comparativos.**

*Technical University of Darmstadt / Germany. bubbledeck internacional [7]*

	<b>BubbleDeck vs. laje maciça</b>		
<i>Em % laje maciça</i>	Mesma capacidade de carga	Mesma rigidez	Mesmo volume de concreto
Capacidade de carga	<b>100</b>	105	150
Rigidez	87	<b>100</b>	300
Volume de concreto	66	<b>69</b>	<b>100</b>

**Tabela 4 – Resultados Comparativos – Cortante.**

*Eindhoven University of Technology. bubbledeck internacional [7]*

<b>Capacidade de Corte (em % de laje maciça)</b>	a/d = 2.15	a/d = 3.0
Laje Maciça	100	100
BubbleDeck, treliças soldadas	91	78(81) <sup>1</sup>
BubbleDeck, treliças amarradas	77	

<sup>1</sup> Correção para elementos de testes com maior tempo de endurecimento.

a – distância da carga até o apoio

d - espessura

**Tabela 5 – Resultados Comparativos – Cortante.**

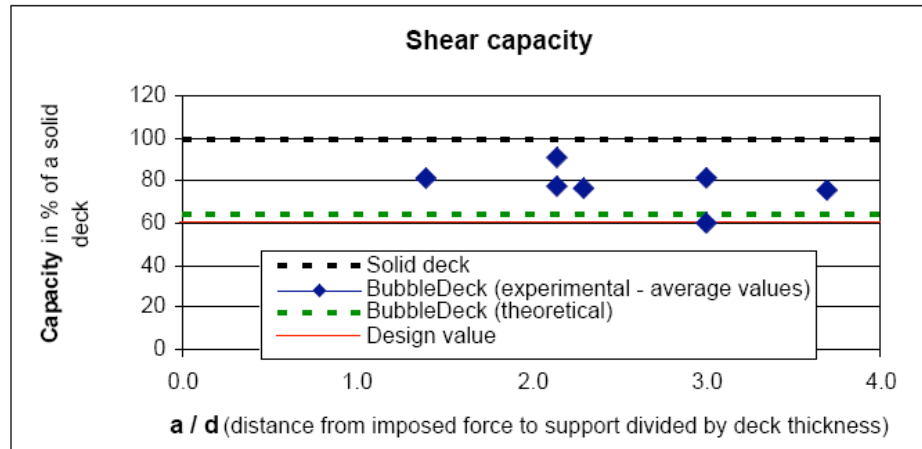
*The Engineering School in Horsens / Denmark. bubbledeck internacional [7]*

<b>Capacidade de Corte (em % de laje maciça)</b>	a/d = 2.3
Laje maciça	100
BubbleDeck, sem treliças	76

a – distância da carga até o apoio

d - espessura

Da figura 9, pode-se notar que é recomendado utilizar para a resistência ao esforço cortante um valor de 60% em relação à de uma laje maciça.



**Figura 9 – Gráfico dos Resultados Comparativos – Cortante.**

*The Technical University of Denmark. bubbledeck internacional [7]*

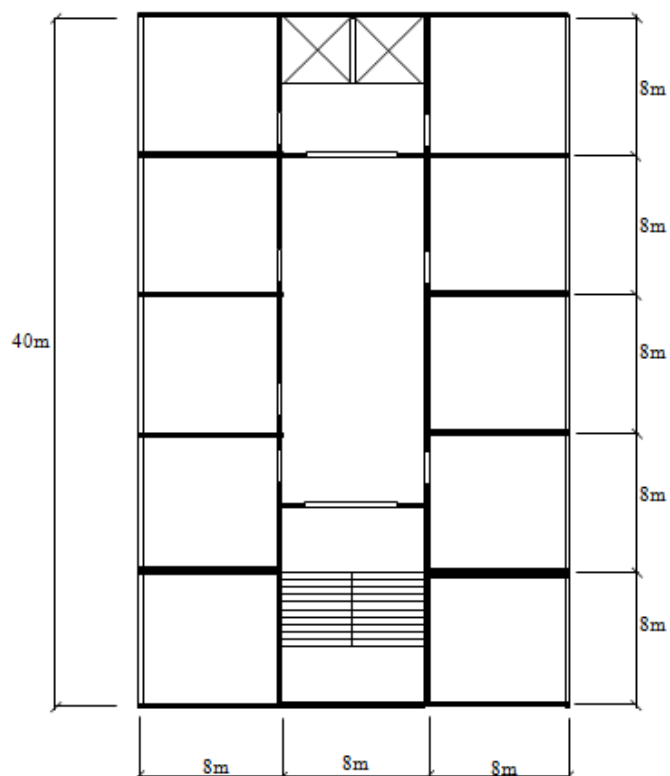
#### 4. Projeto de um pavimento

Para o estudo do comportamento das lajes em questão, foi utilizado um conjunto de painéis de um pavimento típico de uma edificação com carregamentos usuais, composto por um conjunto de painéis de 8,0m x 8,0m. Foi utilizado concreto com  $f_{ck}=30\text{MPa}$  e aço CA50.

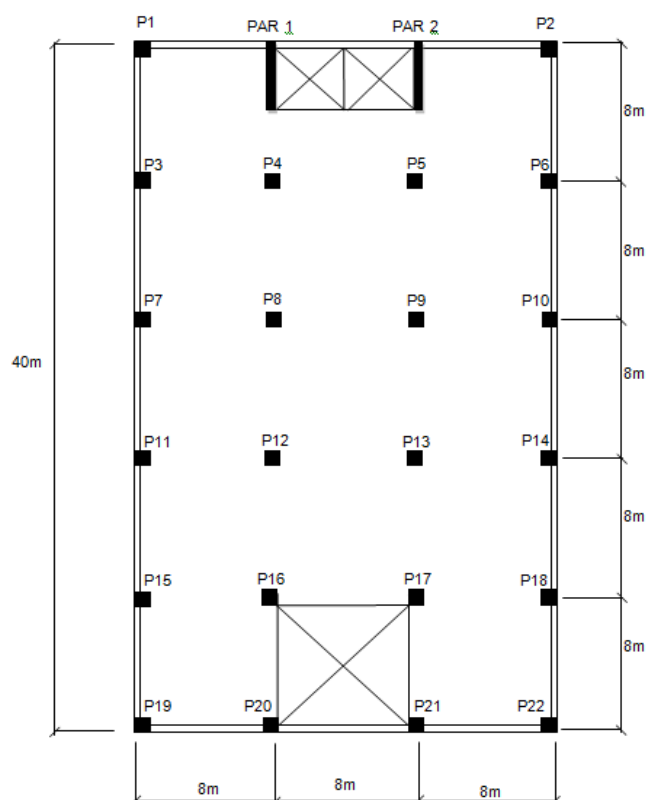
O programa SAP2000 [1] foi usado para obtenção dos esforços na laje. Todos os painéis foram divididos em elementos finitos de placa com 0,4x0,4m, a fim de se obter esforços mais precisos. Os pilares têm dimensões 30cm x 30cm com 3,5m de altura e foram modelados através de elementos finitos sólidos. As alvenarias possuem 15 cm de espessura e são constituídas de tijolo cerâmico furado e argamassa.

As paredes do elevador foram modeladas com elementos finitos de casca. As lajes são apoiadas diretamente em pilares, sendo projetada uma faixa em todo o contorno do pavimento, conforme mostrado na figura 11.

As figuras 10 e 11 representam a planta de arquitetura e de fôrmas do pavimento tipo analisado, respectivamente.



**Figura 10 – Planta de arquitetura do pavimento tipo**



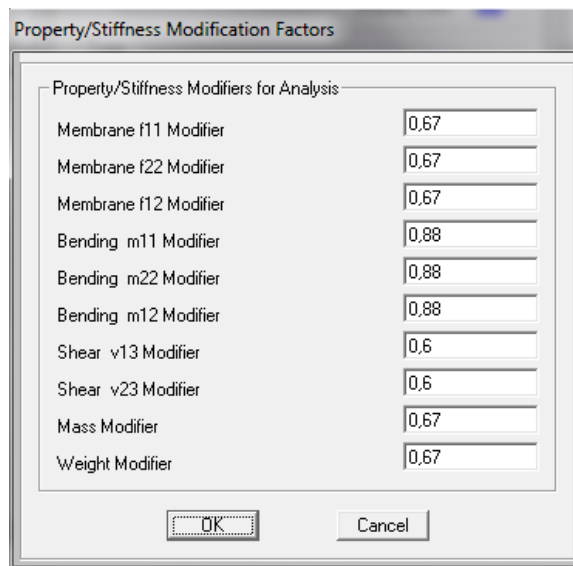
**Figura 11 – Planta de fôrmas do pavimento tipo**

#### **4.1 Laje bubbledeck BD230**

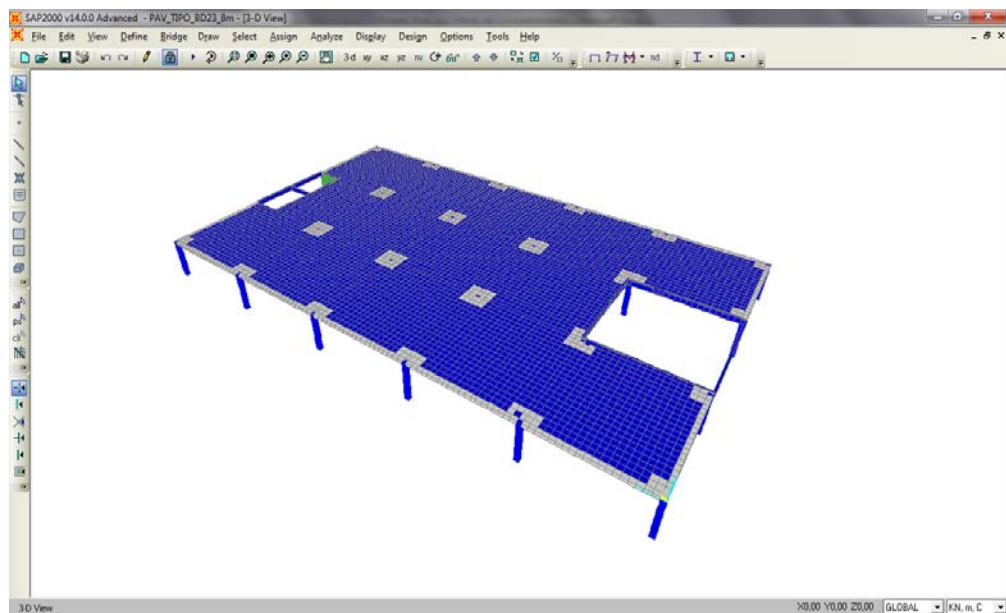
Foi escolhida para este vão a laje *bubbledeck* com espessura de 23 cm, conhecida como BD230, conforme citado no item 3.3 deste trabalho. Este tipo de laje tem como princípio a não utilização de elementos de viga, tal como as lajes lisas.

Os trechos de laje maciça foram simulados como elementos finitos de área de espessura de 23 cm, bem como os trechos de laje de *bubbledeck*, que receberam fatores de redução para as rigezas e para seu peso. Nas regiões em torno dos pilares e nos bordos foram utilizados elementos de laje maciça de mesma espessura da laje *bubbledeck*, porém sem nenhum fator de redução. As regiões de laje maciça em torno dos pilares foram considerados com área de 1,8x1,8m, e nos bordos das lajes uma faixa com largura de 0,3m.

Os fatores de redução para a laje *bubbledeck* utilizados foram os valores da tabela 2. As reduções empregadas e o modelo de elementos finitos estão apresentados na figura 12 e na figura 13, respectivamente.



**Figura 12- Fatores de redução empregados para a laje *bubbledeck* BD230**



**Figura 13 - Modelo de elementos finitos pra a laje *bubbledeck* BD230**

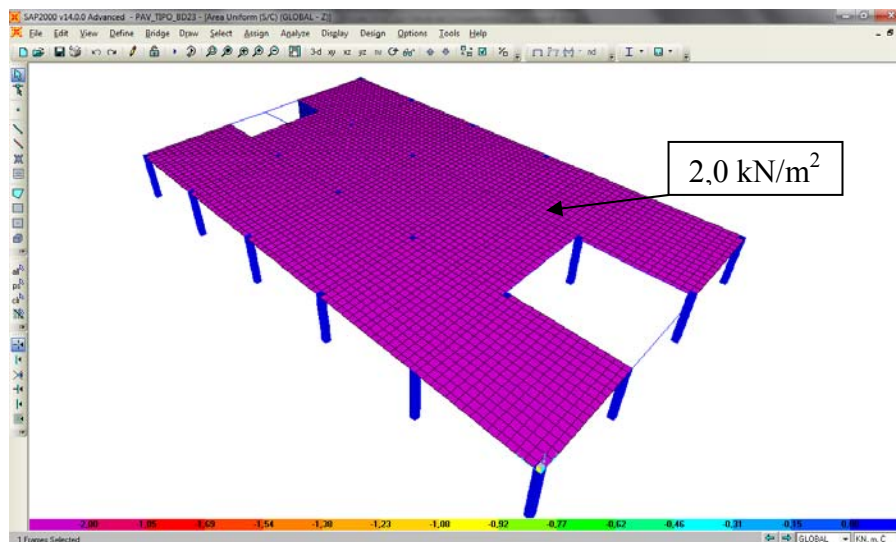
#### 4.1.1 Carregamentos e Combinações

- **Peso Próprio – “DEAD”**

Automaticamente calculado pelo programa SAP2000 [1].

- **Sobrecarga – “SC”**

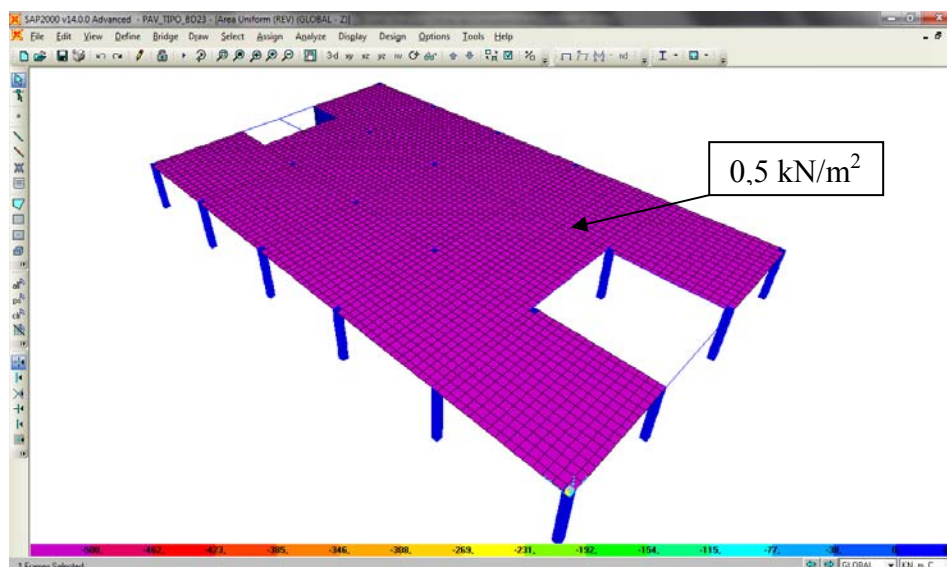
Foi utilizada uma sobrecarga de  $2\text{ kN/m}^2$  em todo o pavimento, representado no modelo conforme figura 14.



**Figura 14 – Carregamento SC**

- **Revestimento – “REV”**

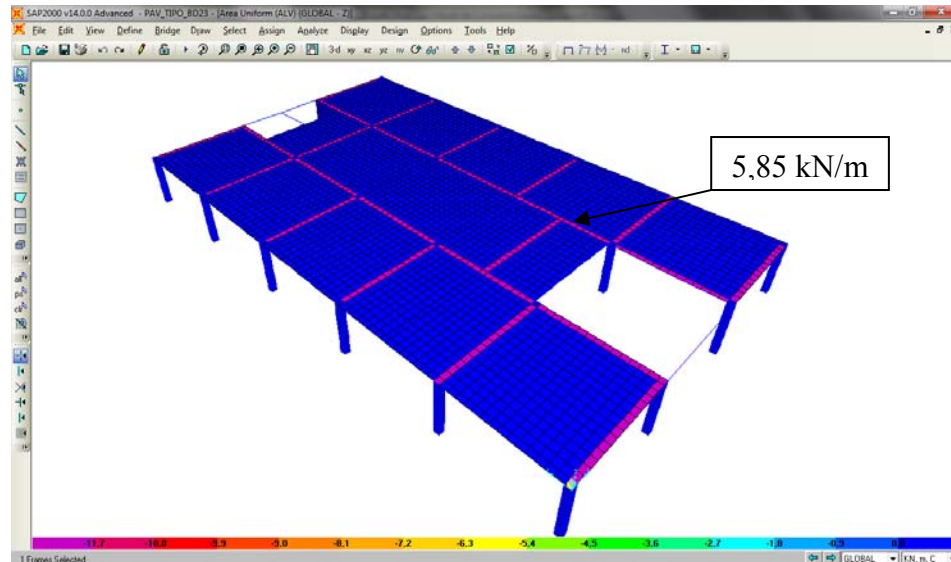
Foi considerado um carregamento de  $0,5\text{ kN/m}^2$  em todo o pavimento, representado no modelo conforme figura 15.



**Figura 15 – Carregamento REV**

- Alvenaria – “ALV”

Foram utilizadas alvenarias de tijolo furado e argamassa, com 15 cm de espessura e 3,0m de altura que resultam em uma carga linear de 5,85 kN/m, representadas conforme figura 16.



**Figura 16 – Carregamento ALV**

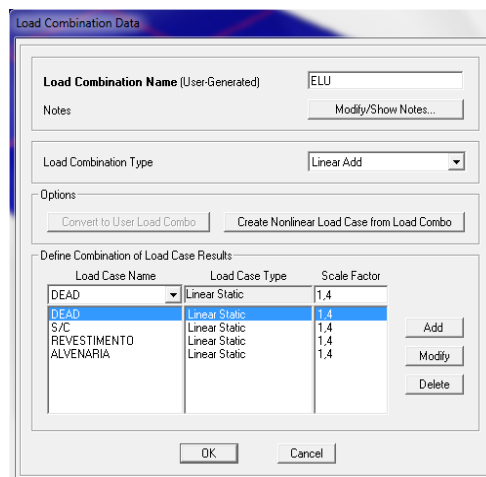
#### 4.1.2 Combinação de Carregamentos

Nas figuras 17 e 18 encontram-se as combinações utilizadas no Estado Limite Último e no Estado Limite de Serviço.

$ELU = 1,4 \times (\text{peso próprio} + \text{sobrecarga} + \text{revestimento} + \text{alvenaria})$

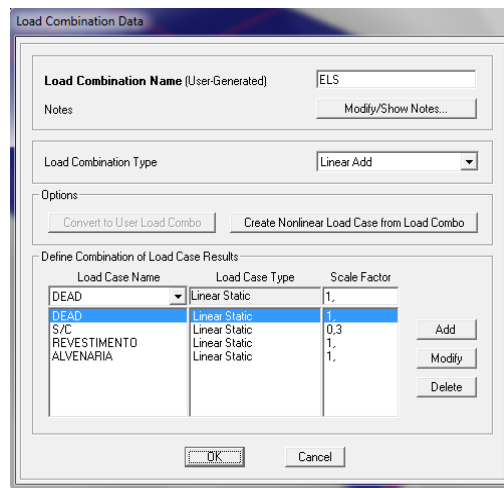
$ELS = \text{peso próprio} + 0,3 \times \text{sobrecarga} + \text{revestimento} + \text{alvenaria}$

Foi utilizado um fator de 0,3 nas cargas acidentais do edifício para combinação quase permanente, segundo NBR6118 [11].



**Figura 17 –Combinação ELU – Estado limite último.**

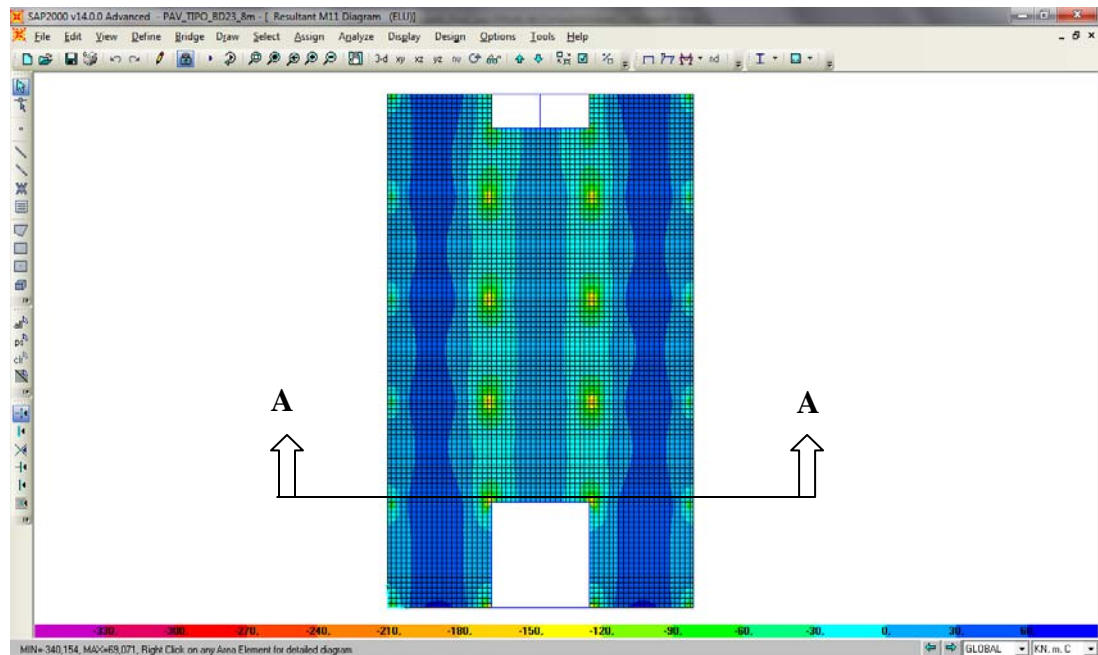




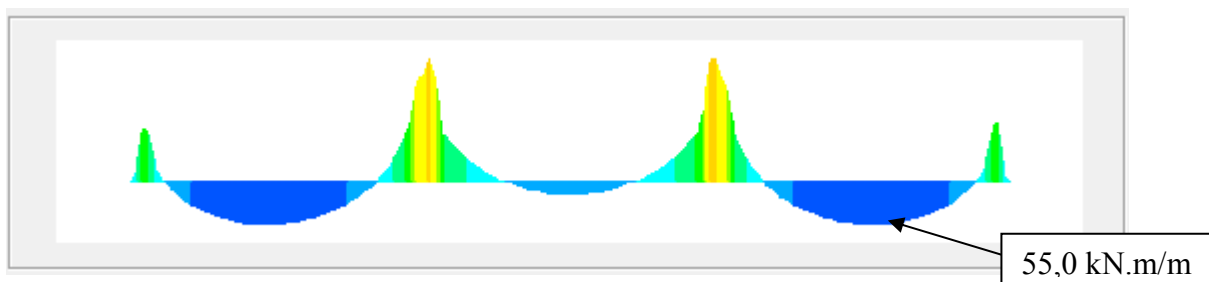
**Figura 18 – Combinação ELS – Estado limite de serviço.**

### 4.1.3 Esforços encontrados

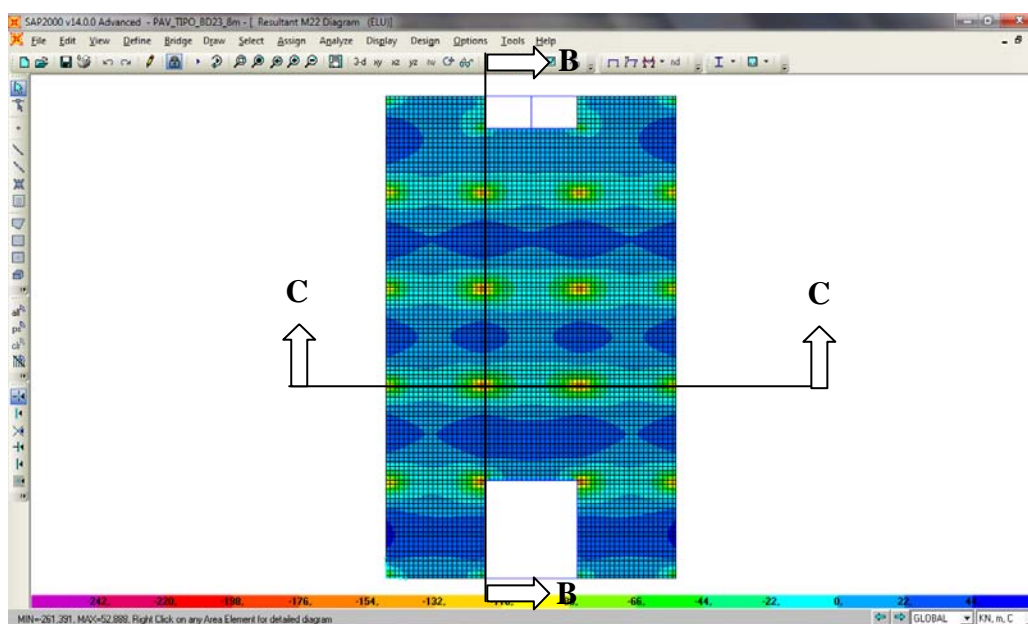
Nas figuras 19 a 23 encontram-se os resultados dos momentos fletores nas duas direções da laje utilizando a combinação ELU. Os momentos considerados para efeito de comparação foram o máximo momento positivo no vão, o máximo momento negativo na face dos pilares e o máximo momento negativo a 25% do vão livre entre pilares.



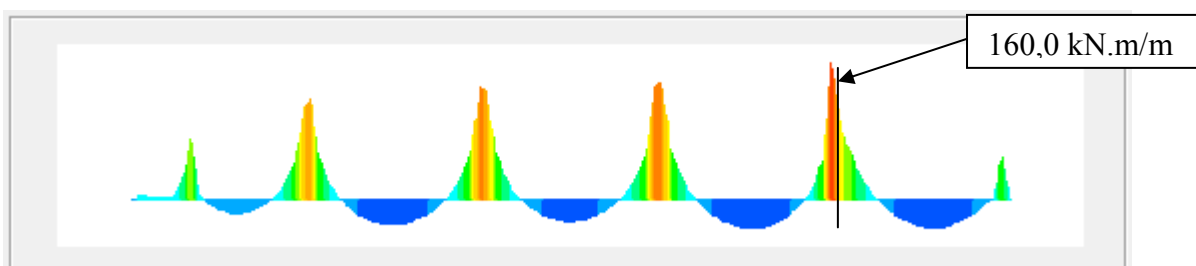
**Figura 19 – Diagrama de momentos (M11)**



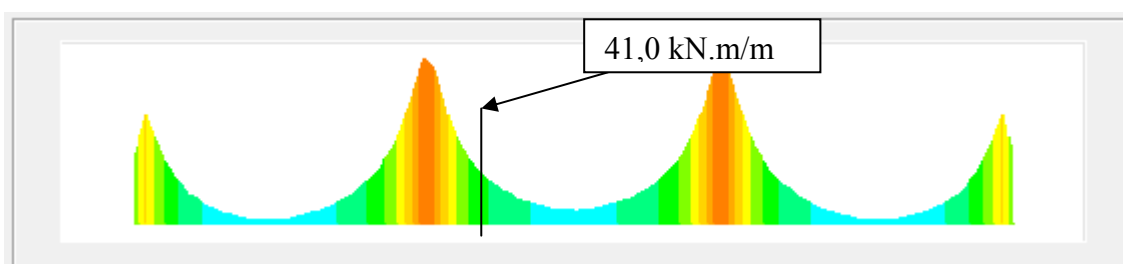
**Figura 20 – Diagrama de momentos – corte A-A (M11)**



**Figura 21 – Diagrama de momentos (M22)**



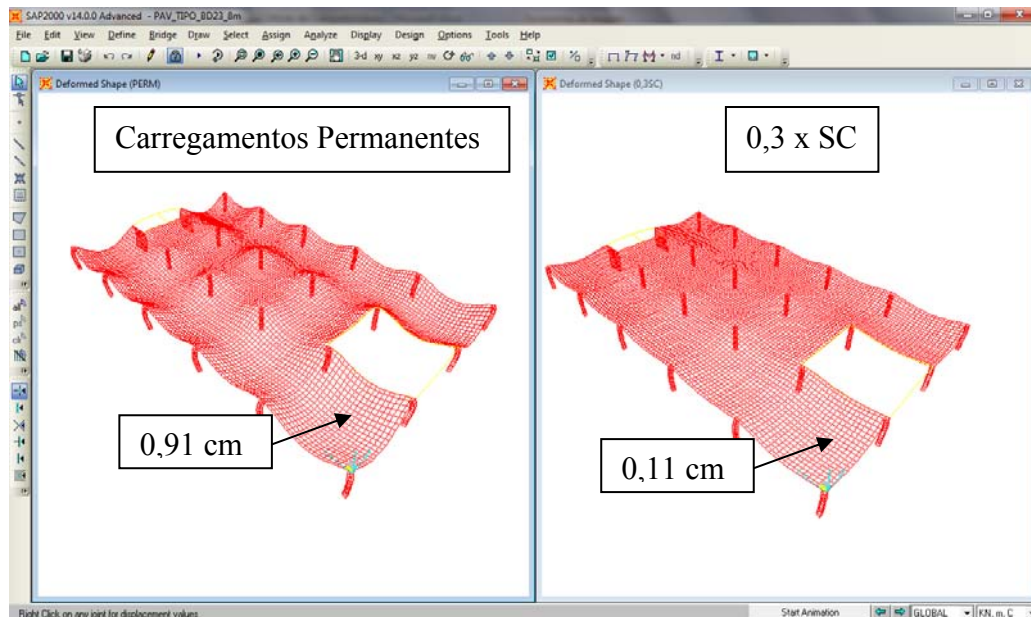
**Figura 22 – Diagrama de momentos – corte B-B (M22)**



**Figura 23 – Diagrama de momentos – corte C-C (M22)**

#### 4.1.4 Flecha máxima

Na figura 24 encontra-se a maior flecha imediata para a combinação ELS, para os carregamentos permanentes e para 0,3 x SC.



**Figura 24 – Flecha para carregamentos permanentes e 0,3 x SC**

Segundo NBR6118 [11] a flecha total é dada pela flecha inicial mais a flecha diferida, que pode ser obtida multiplicando-se a flecha inicial pelo coeficiente  $1 + \alpha_f$ , com:

$$\alpha_f = \Delta\xi / (1 + 50\rho')$$

Para um tempo infinito ( $t \geq 70$  meses) e carregamento aplicado em  $t_0 = 1$  mês, obtém-se:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

$$\rho' = 0 \text{ (taxa de armadura de compressão)}$$

$$\alpha_f = 1,32$$

A flecha diferida somente leva em consideração a ação dos carregamentos permanentes, logo a flecha devido às cargas permanentes resulta em:

$$a_g = a_i \times (1 + \alpha_f) = 0,91 \times (1 + 1,32)$$

$$a_g = 2,11 \text{ cm}$$

A flecha total será:

$$a_t = a_g + a_q = 2,11 + 0,11$$

$$a_t = 2,22 \text{ cm}$$

O limite admissível de flecha é  $1 / 250$ , desta forma:

$$a_t = 2,22 \text{ cm} < 8,00 / 250 = 0,032 \text{ m} = 3,2 \text{ cm}$$

Portanto, o critério de flecha limite está satisfeito.

#### 4.1.5 Armadura inferior do painel

A armadura positiva utilizada no painel foi a mesma nos dois sentidos, sendo o  $f_{ck}=30\text{MPa}$ , o Aço CA-50 e o cobrimento de armadura de 3cm. Todos os dimensionamentos deste trabalho foram feitos utilizando o programa MathCad v.14 [8] e de acordo com NBR6118 [11].

$$M_{d\max} = 55 \text{ kNm/m}$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (\text{eq.1})$$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (\text{eq.2})$$

$$e := 0.23\text{m} \quad c := 0.03\text{m}$$

$$d := e - c = 0.2\text{m}$$

$$f_{cd} := \frac{30\text{MPa}}{1.4} = 2.143 \times 10^4 \cdot \text{kPa} \quad (\text{eq. 3})$$

$$f_{yd} := \frac{500\text{MPa}}{1.15} = 4.348 \times 10^5 \cdot \text{kPa} \quad (\text{eq. 4})$$

$$M_d := 55\text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1\text{m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.064 \quad k_{md}_{bd} := \frac{k_{md}}{0.9} = 0.071 \quad (\text{eq. 5 e 6})$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}_{bd}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x \quad (\text{eq. 7 e 8})$$

$$K_z = 0.956$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 6.615 \cdot \text{cm}^2 / \text{m} \quad (\text{eq. 9})$$

$$A_{s_{\text{adotado}}} = \phi 8,0\text{c}.10 + \phi 10,0\text{c}.40 = 6,99\text{cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.1.6 Armadura superior do painel

Para a armadura negativa dos painéis foi utilizada a armadura mínima, recomendada para detalhamento das malhas da *bubbledeck*, já que os momentos negativos sobre os pilares e nas regiões próximas são os únicos de grandeza considerável.

$$A_{s_{adotado}} = \phi 6,3c.10 = 3,15cm^2 / m$$

#### 4.1.7 Armadura superior de ligação entre painéis

A mesma armadura foi utilizada nos dois sentidos para armadura negativa de ligação entre painéis. O momento utilizado para o dimensionamento é aquele que se encontra a 25% do vão livre a partir da face do pilar.

$$M_{dmax} = 41 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 41 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1m \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.048 \quad k_{md}_{bd} := \frac{k_{md}}{0.9} = 0.053$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}_{bd}}{0.85} \right)^{0.5} \right] \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.968$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 4.872 \cdot \text{cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s_{adotado}} = \phi 8,0c.10 = 5,03cm^2 / m$$

#### 4.1.8 Armadura superior sobre os pilares

A armadura negativa sobre a região dos pilares provém da necessidade de uma armadura adicional devido à concentração de esforços nessa região. O momento máximo foi obtido na face do pilar.

$$M_{\max} = 160 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 160 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.187 \quad k_{md_{bd}} := \frac{k_{md}}{0.9} = 0.207$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md_{bd}}}{0.85} \right)^{0.5} \right] \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.858$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 21.451 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s_{\text{adotado}}} = \phi 12,5 \text{ c.} 10 + \phi 16,0 \text{ c.} 20 = 22,32 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.1.9 Verificação ao puncionamento

A verificação ao puncionamento é necessária em lajes lisas devido ao esforço de força concentrada nas regiões dos pilares. Valor este recomendado para a tecnologia *bubbledeck* devido às esferas, conforme demonstrado no item 3.4 do presente trabalho. Em anexo encontra-se a planilha proveniente do modelo computacional de onde foi retirada a máxima reação de apoio, descontado o peso próprio dos pilares. Conforme sugestão da norma NBR6118 [11], a força de punção  $F_{sd}$  pode ser reduzida da força distribuída aplicada na face oposta da laje, dentro do contorno considerado na verificação.

- Verificação da compressão no contorno C

Força de Cálculo:

$$F_{sd} = 715 \text{ kN}$$

Perímetro no contorno C:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3 \text{ m}$$

$$\mu_0 := 2 \cdot b + 2 \cdot h = 1.2 \text{ m} \quad (\text{eq. 10})$$

Carga distribuída:

$$q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + (0.23 \cdot 25) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 8.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tensão de puncionamento:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4q \cdot (0.3\text{m})^2}{\mu_0 \cdot d} = 2.975 \cdot \text{MPa} \quad (\text{eq. 11})$$

$$\alpha_V := 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 0.88 \quad (\text{eq. 12})$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd2} := 0.27 \cdot \alpha_V \cdot f_{cd} = 5.091 \cdot \text{MPa} \quad (\text{eq. 13})$$

$$\tau_{Sd} < \tau_{Rd2}$$

A verificação da compressão no contorno C está satisfeita.

- Verificação da tensão resistente no contorno C`

Perímetro no contorno C`:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3\text{m} \quad d = 0,20 \text{ m}$$

$$u := 2 \cdot (b + 4d) + 2 \cdot (h + 4d) = 4.4 \text{ m} \quad (\text{eq. 14})$$

Tensão de puncionamento:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4 \cdot q \cdot (1.1\text{m})^2}{\mu \cdot d} = 0.797 \cdot \text{MPa}$$

Taxa de armadura para  $A_s = 22,32 \text{ cm}^2/\text{m}$ :

$$\rho := \frac{A_s}{b_w \cdot h} = 0.0097 \quad (\text{eq. 15})$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd1} := \left[ 0.13 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] = 0.80 \text{ MPa} \quad (\text{eq. 16})$$

$$\tau_{Sd} < \tau_{Rd1}$$

A verificação está satisfeita, logo não é necessário armar ao puncionamento.

- Região de laje maciça em volta do pilar

$$\frac{F_{Sd} - 1.4ql^2}{4 \cdot l \cdot d} = \tau_{Rd} l \quad (\text{eq. 17})$$

$$l := 1.09 \text{ m}$$

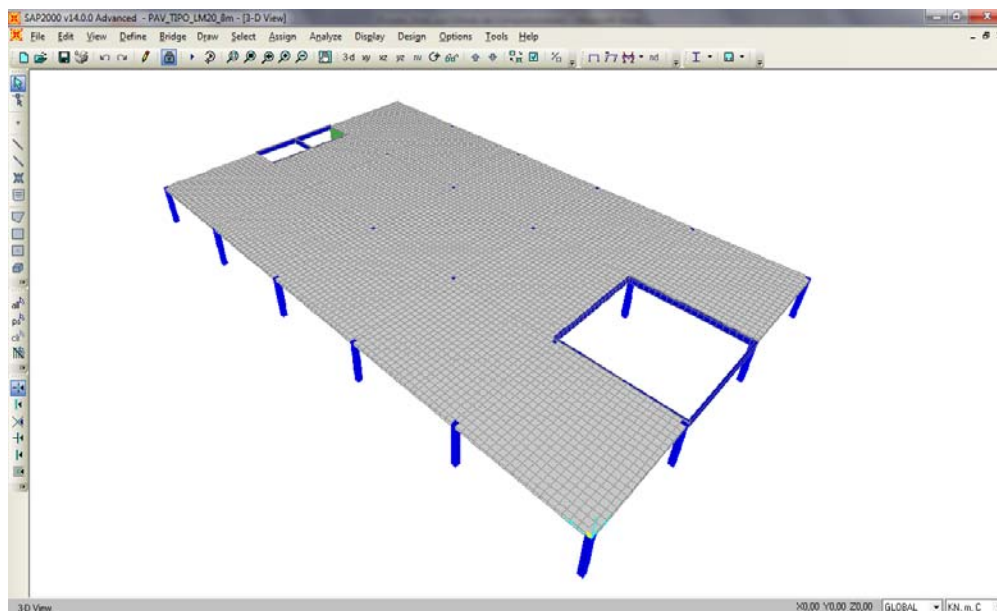
A região de laje maciça estipulada como 1,8x1,8m está satisfeita.



## 4.2 Laje lisa de 18 cm

Para as lajes maciças foi utilizado o mesmo modelo de elementos finitos da laje *bubbledeck*. Esta laje maciça possui altura de 18,0cm. Não existem fatores redutores de peso e rigidez da laje.

O modelo empregado para a laje lisa de 18cm está apresentado na figura 25.



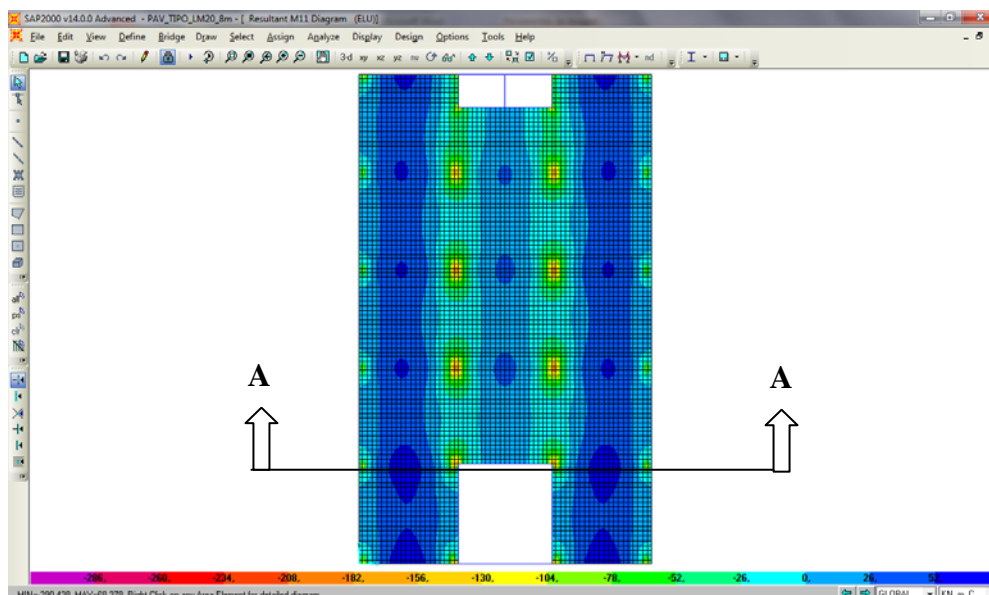
**Figura 25 – Modelo de elementos finitos para a laje lisa de 18cm**

### 4.2.1 Carregamentos e Combinações

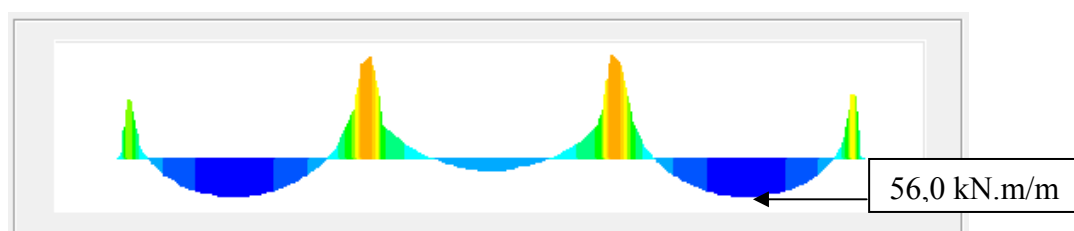
Foram considerados os mesmos carregamentos atuantes e combinações da laje *bubbledeck*, itens 4.1.1 à 4.1.5, para a laje lisa de 18cm.

### 4.2.2 Esforços encontrados

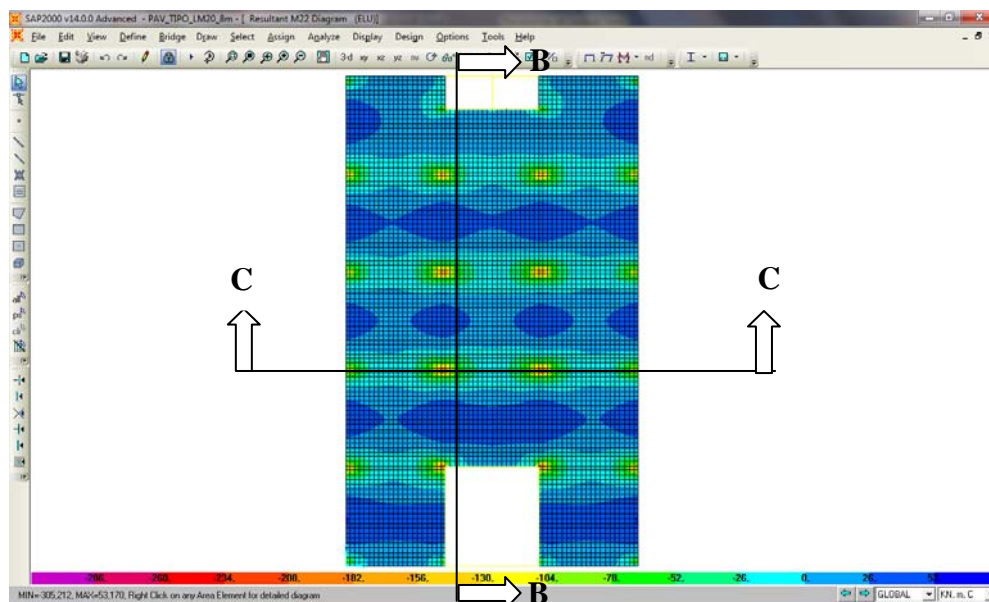
Nas figuras 26 a 30 encontram-se os resultados dos momentos fletores nas duas direções da laje utilizando a combinação ELU. Os momentos considerados foram nas mesmas localizações da laje *bubbledeck*.



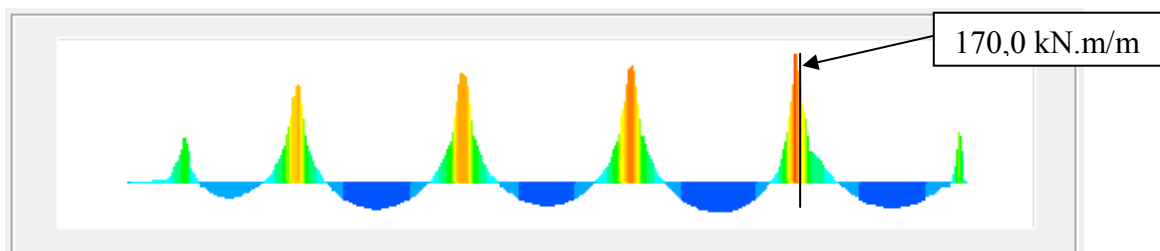
**Figura 26 – Diagrama de momentos (M11)**



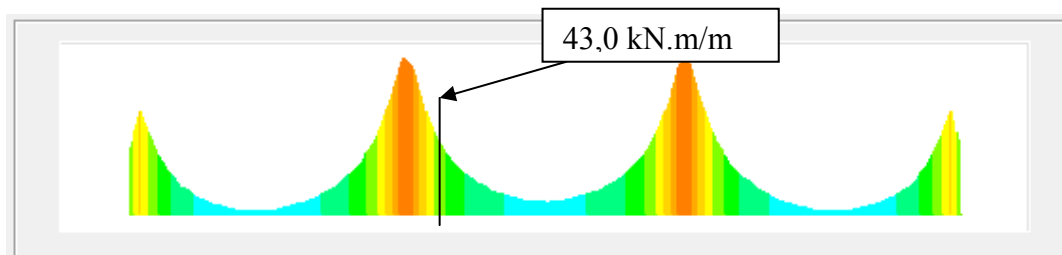
**Figura 27 – Diagrama de momentos – corte A-A (M11)**



**Figura 28 – Diagrama de momentos (M22)**



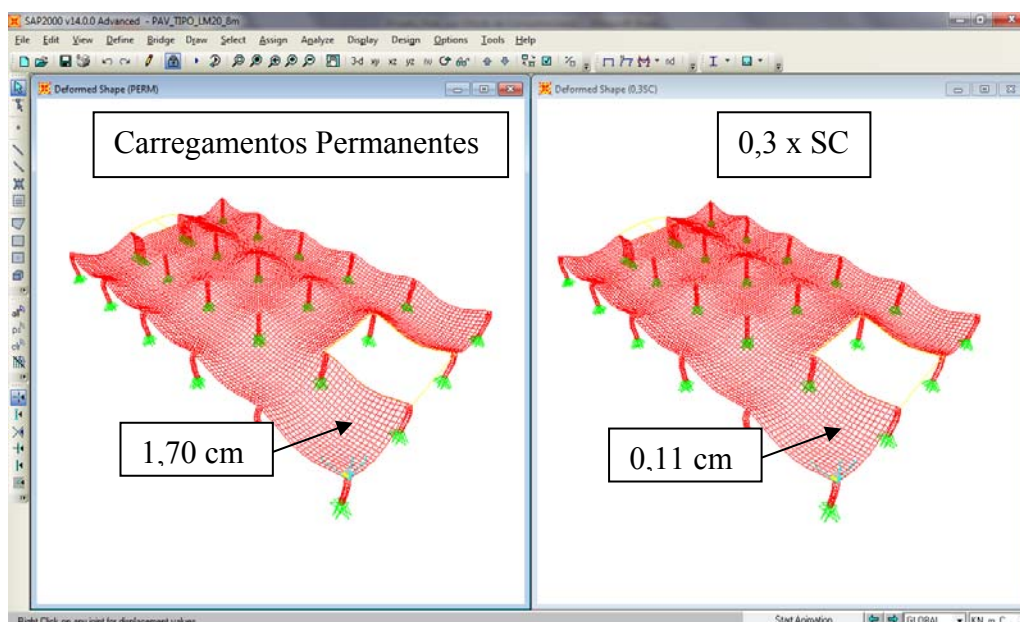
**Figura 29 – Diagrama de momentos – corte B-B (M22)**



**Figura 30 – Diagrama de momentos – corte C-C (M22)**

#### 4.2.3 Flecha máxima

Na figura 31 encontra-se a maior flecha imediata para a combinação ELS, para os carregamentos permanentes e para 0,3 x SC.



**Figura 31 – Flecha para carregamentos permanentes e 0,3 x SC**

Segundo NBR6118 [11] a flecha total é dada pela flecha inicial mais a flecha diferida, que pode ser obtida multiplicando-se a flecha inicial pelo coeficiente  $1 + \alpha_f$ , com:

$$\alpha_f = \Delta\xi / (1 + 50\rho')$$

Para um tempo infinito ( $t \geq 70$  meses) e carregamento aplicado em  $t_0 = 1$  mês, obtém-se:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

$$\rho' = 0 \text{ (taxa de armadura de compressão)}$$

$$\alpha_f = 1,32$$

A flecha diferida somente possui influência sobre os carregamentos de ação permanente, logo a flecha devido às cargas permanentes resulta em:

$$a_g = a_i \times (1 + \alpha_f) = 1,70 \times (1 + 1,32)$$

$$a_g = 3,94 \text{ cm}$$

A flecha total será:

$$a_t = a_g + a_q = 3,94 + 0,11$$

$$a_t = 4,05 \text{ cm}$$

O limite admissível de flecha é  $l / 250$ , desta forma:

$$a_t = 4,05 \text{ cm} > 8,00 / 250 = 0,032 \text{ m} = 3,2 \text{ cm}$$

Portanto, o critério de flecha limite não está satisfeito, logo a utilização deste tipo de laje não é viável. Porém, para fins acadêmicos a armadura será dimensionada normalmente.

#### 4.2.4 Armadura inferior do painel

A armadura positiva utilizada no painel foi a mesma nos dois sentidos, sendo o  $f_{ck}=30\text{MPa}$ , o Aço CA-50 e o cobrimento de armadura de 3cm. Todos os dimensionamentos deste trabalho foram feitos utilizando o programa MathCad v.14 [8] e de acordo com NBR6118 [11].

$$M_{dmax} = 56 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 56 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.116$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.926$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 9.27 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s_{adotado}} = \phi 12,5 \text{ c. } 12,5 = 9,82 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.2.5 Armadura superior do painel

Foi utilizada para a armadura superior das malhas uma armadura mínima semelhante a utilizada para o projeto *bubbledeck*, já que os momentos negativos sobre os pilares e nas regiões próximas são os únicos de grandeza considerável.

$$As_{adotado} = \phi 6,3c.10 = 3,15cm^2 / m$$

#### 4.2.6 Armadura superior de ligação entre painéis

A mesma armadura foi utilizada nos dois sentidos para armadura negativa de ligação entre painéis. O momento utilizado para o dimensionamento é aquele que se encontra a 25% do vão livre a partir da face do pilar.

$$Md_{max} = 43 \text{ kNm/m}$$

$$Md := 43 \text{ kN}\cdot\text{m} / \text{m}$$

$$kmd := \frac{Md}{1m \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.089$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{kmd}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.944$$

$$As := \frac{Md}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 6.981 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$As_{adotado} = \phi 10,0c.10 = 7,85cm^2 / m$$

#### 4.2.7 Armadura superior sobre os pilares

A armadura negativa sobre a região dos pilares provém da necessidade de uma armadura adicional devido à concentração de esforços nessa região. O momento máximo foi obtido na face do pilar.

$$M_{max} = 170 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 170 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.353$$

$$k_{md} > 0.272$$

É necessário utilizar armadura de compressão.

$$k_z = 0.8$$

$$M_{dw} := k_{md} \cdot b_w \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4} = 131.143 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$M_{ds} := M_d - M_{dw} = 38.857 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$A_s := \frac{M_{dw}}{k_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} + \frac{M_{ds}}{(d - c) \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 32.583 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_s' := \frac{M_{ds}}{(d - c) \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 7.448 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s_{\text{adotado}}} = \phi 25,0 c.15 = 32,72 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{s'_{\text{adotado}}} = \phi 10,0 c.10 = 7,85 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.2.8 Verificação à punção

A verificação ao puncionamento é necessária em lajes lisas devido ao esforço de força concentrada nas regiões dos pilares. O dimensionamento segue os mesmos critérios adotados ao da laje *bubbledeck*.

- Verificação da compressão no contorno C

Força de Cálculo:

$$F_{sd} = 754 \text{ kN}$$

Perímetro no contorno C:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3 \text{ m}$$

$$u_0 := 2 \cdot b + 2 \cdot h = 1.2 \text{ m}$$

Carga distribuída:

$$q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + (0.18 \cdot 25) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 7.00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tensão de punção:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4 \cdot q \cdot (1.8\text{m})^2}{\mu_0 \cdot d} = 4.012 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_v := 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 0.88$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd2} := 0.27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} = 5.091 \cdot \text{MPa}$$

$$\tau_{Sd} < \tau_{Rd2}$$

A verificação da compressão no contorno C está satisfeita.

- Verificação da tensão resistente no contorno C`

Perímetro no contorno C`:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3 \text{ m} \quad d = 0,15 \text{ m}$$

$$u_{\text{ww}} := 2 \cdot (b + 4d) + 2 \cdot (h + 4d) = 3.6 \text{ m}$$

Tensão de punção:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4 \cdot q \cdot (0.9\text{m})^2}{\mu \cdot d} = 1.382 \cdot \text{MPa}$$

Taxa de armadura para  $A_s = 32,72 \text{ cm}^2/\text{m}$ :

$$\rho := \frac{A_s}{b_w \cdot h} = 0.0182$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd1} := \left[ 0.13 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] = 1.062 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Sd} > \tau_{Rd1}$$

A verificação não está satisfeita, logo é necessário armar ao punção.

- Dimensionamento da armadura de punção

$$\tau_{sw} := \tau_{Sd} - \left[ 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} \right] = 0.557 \cdot \text{MPa}$$

$$s_r := 0.75 \cdot d = 0.113 \text{ m}$$

$$A_{sw} := \frac{\tau_{sw} \cdot \mu \cdot d \cdot s_r}{1.5 \cdot f_{ywd} \cdot d} = 3.46 \text{ cm}^2$$

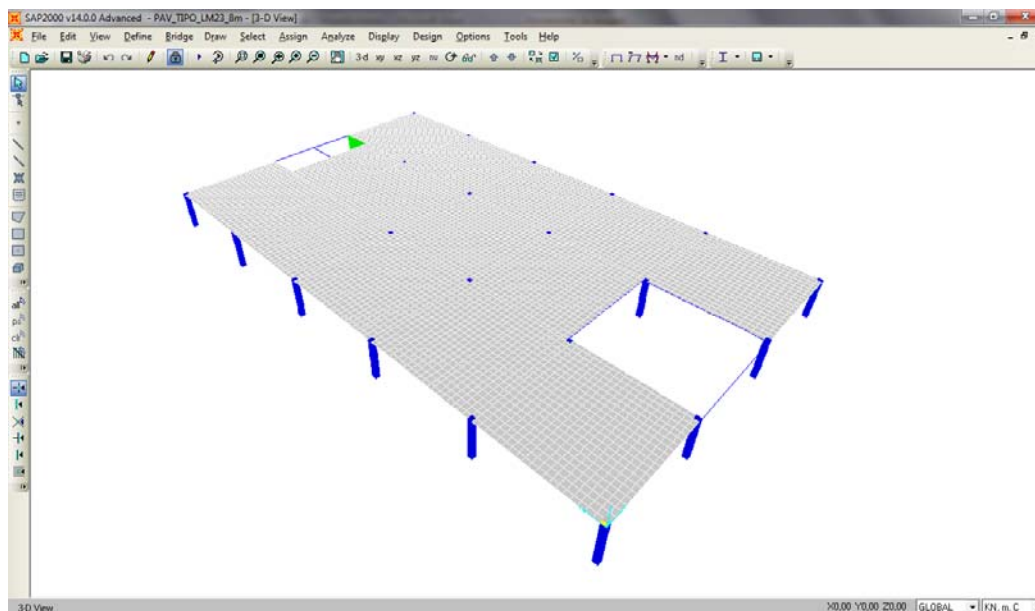
$$A_{sw_{adotado}} = \phi 8,0 c. 12,5 = 4,02 \text{ cm}^2$$



### 4.3 Laje lisa de 23 cm

Como a laje lisa de 18 cm não atendeu ao critério de flechas limites, será também dimensionada uma laje lisa de mesma espessura da laje *bubbledeck*, ou seja, 23,0cm.

O modelo de elementos finitos empregado para a laje lisa de 23cm está apresentado na figura 32.



**Figura 32 – Modelo de elementos finitos para a laje maciça de 23cm**

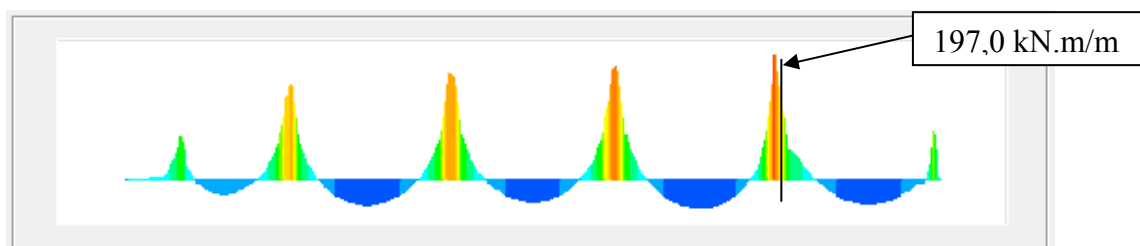
#### 4.3.1 Carregamentos e Combinações

Foram considerados os mesmos carregamentos atuantes e combinações da laje *bubbledeck*, itens 4.1.1 à 4.1.5, para a laje lisa de 23cm.

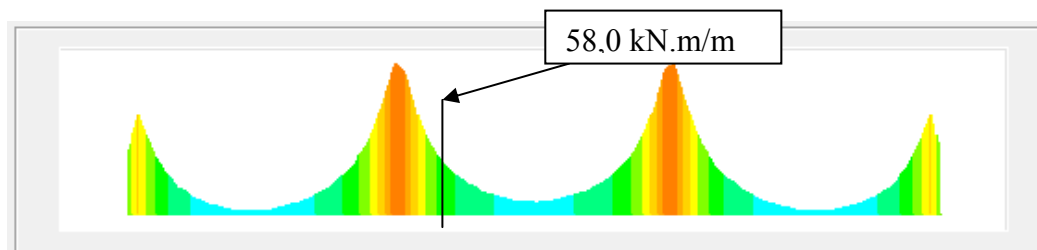
#### 4.3.2 Esforços encontrados

Nas figuras 33 a 37 encontram-se os resultados dos momentos fletores nas duas direções da laje utilizando a combinação ELU. Os momentos foram considerados nas mesmas localizações da laje *bubbledeck*.





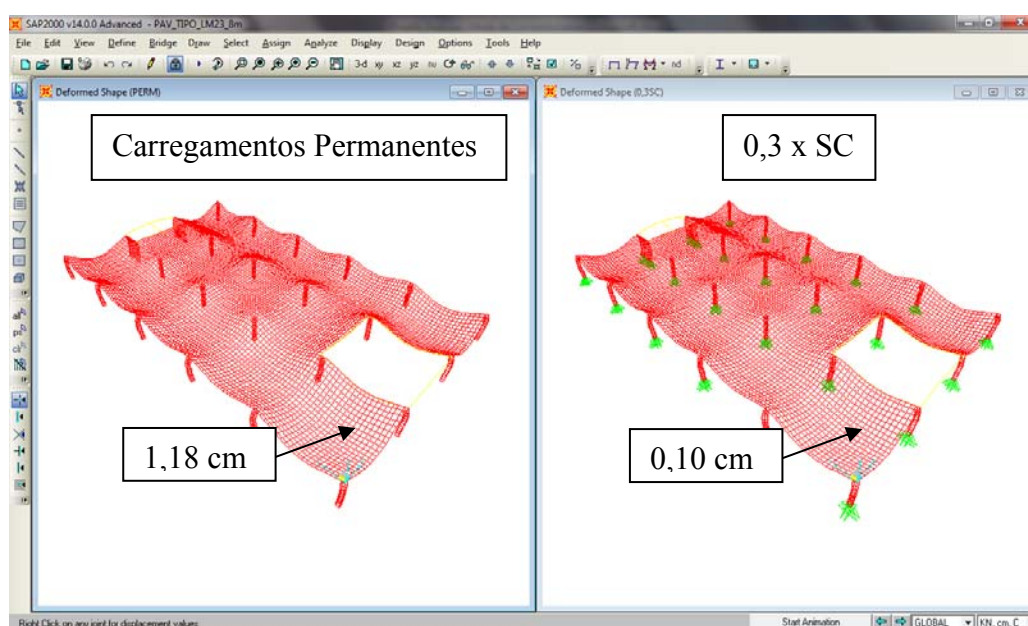
**Figura 36 – Diagrama de momentos – corte B-B (M22)**



**Figura 37 – Diagrama de momentos – corte C-C (M22)**

#### 4.3.3 Flecha máxima

Na figura 38 encontra-se a maior flecha imediata para a combinação ELS, para os carregamentos permanentes e para 0,3 x SC.



**Figura 38 – Flecha para carregamentos permanentes e 0,3 x SC**

Segundo NBR6118 [11] a flecha total é dada pela flecha inicial mais a flecha diferida, que pode ser obtida multiplicando-se a flecha inicial pelo coeficiente  $1 + \alpha_f$ , com:

$$\alpha_f = \Delta \xi / (1 + 50 \rho')$$

Para um tempo infinito ( $t \geq 70$  meses) e carregamento aplicado em  $t_0 = 1$  mês, obtém-se:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

$$\rho' = 0 \text{ (taxa de armadura de compressão)}$$

$$\alpha_f = 1,32$$

A flecha diferida somente possui influência sobre os carregamentos de ação permanente, logo a flecha devido às cargas permanentes resulta em:

$$a_g = a_i \times (1 + \alpha_f) = 1,18 \times (1 + 1,32)$$

$$a_g = 2,74 \text{ cm}$$

A flecha total será:

$$a_t = a_g + a_q = 2,74 + 0,10$$

$$a_t = 2,84 \text{ cm}$$

O limite admissível de flecha é  $l / 250$ , desta forma:

$$a_t = 2,84 \text{ cm} < 8,00 / 250 = 0,032 \text{ m} = 3,2 \text{ cm}$$

Portanto, o critério de flecha limite está satisfeito.

#### 4.3.4 Armadura inferior do painel

A armadura positiva utilizada no painel foi a mesma nos dois sentidos, sendo o  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ , o Aço CA-50 e o cobrimento de armadura de 3cm. Todos os dimensionamentos deste trabalho foram feitos utilizando o programa MathCad v.14 [8] e de acordo com NBR6118 [11].

$$M_{dmax} = 71 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 71 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.083$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.949$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 8.607 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{adotado} = \phi 12,5 \text{ c. } 12,5 = 9,82 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.3.5 Armadura superior do painel

Foi utilizada para a armadura superior das malhas uma armadura mínima semelhante à utilizada para o projeto *bubbledeck*, já que os momentos negativos sobre os pilares e nas regiões próximas são os únicos de grandeza considerável.

$$A_{adotado} = \phi 6,3c.10 = 3,15cm^2 / m$$

#### 4.3.6 Armadura superior de ligação entre painéis

A mesma armadura foi utilizada nos dois sentidos para armadura negativa de ligação entre painéis. O momento utilizado para o dimensionamento é aquele que se encontra a 25% do vão livre a partir da face do pilar.

$$M_{dmax} = 58 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 58 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.068$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4K_x$$

$$K_z = 0.958$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 6.959 \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{adotado} = \phi 10,0c.10 = 7,85cm^2 / m$$

#### 4.3.7 Armadura superior sobre os pilares

A armadura negativa sobre a região dos pilares provém da necessidade de uma armadura adicional devido à concentração de esforços nessa região. O momento máximo foi obtido na face do pilar.

$$M_{\max} = 197 \text{ kNm/m}$$

$$M_d := 197 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$k_{md} := \frac{M_d}{1 \text{ m} \cdot d^2 \cdot \frac{f_{ck}}{1.4}} = 0.23$$

$$K_x := \frac{\left[ 1 - \left[ 1 - \left( 2 \cdot \frac{k_{md}}{0.85} \right) \right]^{0.5} \right]}{0.8} \quad K_z := 1 - 0.4 K_x$$

$$K_z = 0.839$$

$$A_s := \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot \frac{f_{yk}}{1.15}} = 27.008 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

$$A_{\text{adotado}} = \phi 20,0 \text{ c.} 10 = 31,42 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

#### 4.3.8 Verificação à punção

A verificação ao puncionamento é necessária em lajes lisas devido ao esforço de força concentrada nas regiões dos pilares. O dimensionamento segue os mesmos critérios adotados ao da laje *bubbledeck*.

- Verificação da compressão no contorno C

Força de cálculo:

$$F_{sd} = 888 \text{ kN}$$

Perímetro do contorno C:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3 \text{ m}$$

$$\mu_0 := 2 \cdot b + 2 \cdot h = 1.2 \text{ m}$$

Carga distribuída:

$$q := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + (0.23 \cdot 25) \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 8.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tensão de puncionamento:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4 \cdot q \cdot (0.3\text{m})^2}{\mu_0 \cdot d} = 3.696 \cdot \text{MPa}$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd2} := 0.27 \cdot \alpha_V \cdot f_{cd} = 5.091 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_V := 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 0.88$$

$$\tau_{Sd} < \tau_{Rd2}$$

A verificação da compressão no contorno C está satisfeita.

- Verificação da tensão resistente no contorno C`

Perímetro no contorno C`:

$$b = 0,3 \text{ m} \quad h = 0,3 \text{ m} \quad d = 0,15 \text{ m}$$

$$u := 2 \cdot (b + 4d) + 2 \cdot (h + 4d) = 4.4 \text{ m}$$

Tensão de puncionamento:

$$\tau_{Sd} := \frac{F_{Sd} - 1.4 \cdot q \cdot (1.1\text{m})^2}{\mu \cdot d} = 0.993 \cdot \text{MPa}$$

Taxa de armadura para  $A_s = 31,42 \text{ cm}^2/\text{m}$ :

$$\rho := \frac{A_s}{b_w \cdot h} = 0.0137$$

Tensão resistente:

$$\tau_{Rd1} := \left[ 0.13 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] = 0.896 \text{ MPa}$$

$$\tau_{Sd} > \tau_{Rd1}$$

A verificação não está satisfeita, logo é necessário armar ao puncionamento.

- Dimensionamento da armadura de punção

$$\tau_{sw} := \tau_{Sd} - \left[ 0.1 \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot \text{MPa} \right] = 0.304 \cdot \text{MPa}$$

$$s_r := 0.75 \cdot d = 0.15 \text{ m}$$

$$A_{sw} := \frac{\tau_{sw} \cdot \mu \cdot d \cdot s_r}{1.5 \cdot f_{ywd} \cdot d} = 3.073 \text{ cm}^2$$

$$A_{sw_{adotado}} = \phi 8,0 c.15 = 3,35 \text{ cm}^2$$



## 5. Taxas e Comparativos

A seguir são demonstrados os cálculos para a obtenção das taxas para a laje *bubbledeck*, laje lisa de 18cm e laje lisa de 23cm. Além da vantagem observada nas taxas e comparação quantitativa demonstrada a seguir, vale ressaltar que a laje *bubbledeck* demonstrou comportamento acústico e térmico similar às lajes maciças segundo testes realizados por institutos acadêmicos na Europa [7]. As taxas de armadura foram calculadas a partir da armadura adotada.

Para a laje *bubbledeck* foram obtidas as seguintes taxas de armadura:

- Armadura inferior do painel (6,99cm<sup>2</sup>/m)

$$\rho = \frac{6,99}{23 \cdot 100} \times 100 = 0,304\%$$

- Armadura superior de ligação entre painéis (5,03cm<sup>2</sup>/m)

$$\rho = \frac{5,03}{23 \cdot 100} \times 100 = 0,219\%$$

- Armadura superior sobre os pilares (22,32cm<sup>2</sup>/m)

$$\rho = \frac{22,32}{23 \cdot 100} \times 100 = 0,970\%$$

O volume de concreto total é obtido retirando-se da região onde há esferas o volume das mesmas.

$$\text{Área total de um painel} = 64\text{m}^2$$

$$\text{Área de laje maciça em um painel} = 1,80 \text{ m} \times 1,80 \text{ m} = 3,24\text{m}^2$$

$$\text{Área de laje } bubbledeck \text{ em um painel} = 60,76 \text{ m}^2$$

$$\text{Espessura total da laje} = 0,23\text{m}$$

$$V_{\text{concreto}} = (60,76 \times 0,23 - V_{\text{esferas}}) + 3,24 \times 0,23$$

Para estimar o número de esferas foi usada como referência a tabela 2, adotando-se um número de 25 esferas/m<sup>2</sup>. Logo, o número de esferas em um painel será de 1519 esferas.

$$V_{\text{esferas}} = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3 \times 1519 = 4,64 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{concreto}} = 10,08\text{m}^3$$

As taxas de armadura para a laje lisa de 18cm e laje lisa de 23cm foram calculadas da mesma forma que para a laje *bubbledeck* e se encontram na tabela 6.

O volume de concreto total para a laje lisa de 18cm é o volume total da laje de um painel.

$$V_{\text{concreto}} = 64\text{m}^2 \times 0,18\text{m} = 12,24\text{m}^3$$

A laje *bubbledeck* gerou uma economia de 18% de volume de concreto em relação a laje lisa de 18cm.

O volume de concreto total obtido para a laje lisa de 23cm segue o mesmo raciocínio da laje lisa de 18cm

$$V_{\text{concreto}} = 64\text{m}^2 \times 0,23\text{m} = 14,72\text{m}^3$$

A laje *bubbledeck* gerou uma economia de 32% de volume de concreto em relação à laje lisa de 23cm.

Na tabela 6 são fornecidos os valores comparativos das taxas de armadura em percentual para todos os tipos de laje com os respectivos esforços dimensionantes entre parênteses.

**Tabela 6 – Comparativo de taxas de armadura e esforços máximos**

	Armadura inferior do painel	Armadura superior entre painéis	Armadura superior sobre os pilares	Armadura de punção
Laje <i>bubbledeck</i>	0,304% (55kN.m/m)	0,219% (41kN.m/m)	0,97% (160kN.m/m)	0,00% (715kN)
Laje lisa de 18cm	0,546% (56kN.m/m)	0,436% (43kN.m/m)	2,254% (170kN.m/m)	0,175% (754kN)
Laje lisa de 23cm	0,427% (71kN.m/m)	0,341% (58kN.m/m)	1,366% (197kN.m/m)	0,146% (888kN)

Na tabela 7 é realizada a comparação entre o volume total de concreto consumido e as flechas máximas encontradas.

**Tabela 7 – Comparativo de volume de concreto e flechas máximas**

	Volume de concreto (m <sup>3</sup> )	Flecha máxima (cm)
Laje <i>bubbledeck</i>	10,08	2,22
Laje lisa de 18cm	12,24	4,05
Laje lisa de 23cm	14,72	2,84

## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Novas alternativas tecnológicas de construção estão a todo o momento aparecendo, de forma a melhorar a construção civil e gerar economia associada a uma menor geração de resíduos, além do uso de materiais ecologicamente corretos. É neste panorama que nasceu a idéia do *bubbledeck*.

O presente trabalho comparou as lajes *bubbledeck*, lajes lisas de 18cm e lajes lisas de 23cm. O assunto foi exposto na tentativa de se abranger de maneira generalizada o projeto em lajes *bubbledeck*. Viabilidade econômica, aspectos construtivos e qualidades foram demonstrados.

A laje *bubbledeck* do projeto analisado se mostrou a mais aplicável e econômica levando em conta os resultados obtidos quando comparada às demais, comprovando assim as expectativas iniciais do autor.

A laje utilizando tal tecnologia resultou em um menor consumo de aço, menor consumo de concreto e menor flecha máxima, critério este que invalidou a utilização da laje lisa de 18cm. É importante salientar que além dos fatores econômicos a *bubbledeck* leva também vantagem no conforto gerado ao usuário, citado anteriormente, verificadas por instituições renomadas e também vivenciadas em diversas construções ao redor do mundo. A solução mostrou-se bastante simples em seu dimensionamento quando adaptado à norma brasileira e demonstra uma facilidade construtiva, havendo formas diferentes de execução para cada caso específico.

Ainda relacionado ao aspecto financeiro do empreendimento, pode-se mencionar que as fundações são uma parcela considerável no custo final da estrutura e, portanto, uma estrutura que consome menos material, como a *bubbledeck*, transmitirá menos carga ao solo e conseqüentemente precisará de fundações menores.

Portanto, apesar de exigir um grau de sofisticação maior em sua execução, como mão-de-obra mais especializada, as lajes *bubbledeck* mostraram-se vantajosas em praticamente todos os aspectos, tais como: economia de material, desempenho estrutural e conforto aos usuários.

Por fim, o presente projeto aliado à oportunidade de acompanhar projetos com a tecnologia *bubbledeck*, que serão executados no Brasil, está sendo de grande valia para minha formação como engenheiro civil.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de testes experimentais, de modo a confirmar se os dados fornecidos pelo fabricante da laje *bubbledeck* são coerentes.

É importante também fazer uma análise comparativa de tempo de execução e custos para se ter uma melhor avaliação dos resultados.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] SAP2000, 2010, *Structural Analysis & Design*, Versão 14.0.0, Computers and Structures, California, USA.
- [2] WIKIPEDIA, *Voided biaxial slab*, disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Voided\\_biaxial\\_slab](http://en.wikipedia.org/wiki/Voided_biaxial_slab)>, Acesso em: 1 de setembro de 2011.
- [3] WIKIPEDIA, *Millenium Tower (Rotterdam)*, disponível em <[http://en.wikipedia.org/wiki/Millennium\\_Tower\\_\(Rotterdam\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Millennium_Tower_(Rotterdam))>, Acesso em: 5 de setembro de 2011.
- [4] FREIRE, T. C., 2009, *Estudo comparativo para lajes cogumelo utilizando as tecnologias “bubbledeck” e atex*, Projeto de graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [5] LEONHARDT, F., MONNIG, E., 1979, *Construções de Concreto*, Vol. 3, 1ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- [6] BUBBLEDECK BRASIL, disponível em <<http://www.bubbledeckbrasil.com.br>>, Acesso em: 28 de agosto de 2011.
- [7] BUBBLEDECK INTERNACIONAL, *Bubbledeck Design Guide*, disponível em <<http://www.bubbledeck-uk.com>>, Acesso em: 25 de julho de 2011.
- [8] MATHCAD, 2007, Versão 14.0, Computers and Structures, Massachusetts, USA.

### Normas técnicas:

- [9] DIN 1045, 2001, Concrete – German code for the design of concrete structures.
- [10] EN 13747, 2005, Concrete – Precast concrete products – Floor plates for floor systems.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118, 2003, Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado.

## 8. Anexos

### 8.1 Reações de apoio da laje *bubbledeck*

Reações de Apoio - BD230				
Nó	Combinação	Rz (kN)		
12784	ELU	58,3		
12785	ELU	-63,0		
12786	ELU	142,5		Fsd (kN)
12787	ELU	21,2	P1	152,312
12904	ELU	-62,7		
12905	ELU	58,4		
12906	ELU	21,1		Fsd (kN)
12907	ELU	142,2	P2	152,298
12304	ELU	162,5		
12305	ELU	-4,2		
12306	ELU	153,1		Fsd (kN)
12307	ELU	-13,5	P3	291,13
12344	ELU	127,8		
12345	ELU	168,6		
12346	ELU	153,6		Fsd (kN)
12347	ELU	194,3	P4	637,488

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12704	ELU	168,9		
12705	ELU	127,5		
12706	ELU	194,5		Fsd (kN)
12707	ELU	153,1	P5	637,22
12744	ELU	-3,7		
12745	ELU	162,5		
12746	ELU	-13,5		Fsd (kN)
12747	ELU	152,7	P6	291,129
12224	ELU	155,4		
12225	ELU	-8,2		
12226	ELU	150,6		Fsd (kN)
12227	ELU	-13,0	P7	278,1
12264	ELU	162,6		
12265	ELU	198,3		
12266	ELU	150,9		Fsd (kN)
12267	ELU	186,6	P8	691,7

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12624	ELU	198,8		
12625	ELU	162,2		
12626	ELU	187,2		Fsd (kN)
12627	ELU	150,5	P9	691,9
12664	ELU	-7,6		
12665	ELU	155,3		
12666	ELU	-12,8		Fsd (kN)
12667	ELU	150,1	P10	278,2
12144	ELU	154,8		
12145	ELU	-10,7		
12146	ELU	152,1		Fsd (kN)
12147	ELU	-13,4	P11	276,0
12184	ELU	157,8		
12185	ELU	193,0		
12186	ELU	167,8		Fsd (kN)
12187	ELU	203,0	P12	714,8
12464	ELU	193,0		
12465	ELU	157,6		
12466	ELU	203,0		Fsd (kN)
12467	ELU	167,6	P13	714,5

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12584	ELU	-9,4		
12585	ELU	161,4		
12586	ELU	-15,5		Fsd (kN)
12587	ELU	146,4	P14	276,2
11984	ELU	171,7		
11985	ELU	-23,0		
11986	ELU	184,0		Fsd (kN)
11987	ELU	-10,7	P15	315,3
12024	ELU	100,0		
12025	ELU	222,4		
12026	ELU	56,5		Fsd (kN)
12027	ELU	178,9	P16	551,1
12424	ELU	223,2		
12425	ELU	99,3		
12426	ELU	179,6		Fsd (kN)
12427	ELU	55,7	P17	551,0
12544	ELU	-22,0		
12545	ELU	171,7		
12546	ELU	-10,5		Fsd (kN)
12547	ELU	183,2	P18	315,7

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12104	ELU	163,2		
12105	ELU	26,9		
12106	ELU	56,1		Fsd (kN)
12107	ELU	-80,1	P19	159,3
12064	ELU	64,5		
12065	ELU	154,5		
12066	ELU	-42,4		Fsd (kN)
12067	ELU	47,5	P20	217,4
12384	ELU	155,3		
12385	ELU	63,9		
12386	ELU	48,2		Fsd (kN)
12387	ELU	-43,3	P21	217,4
12504	ELU	27,8		
12505	ELU	162,6		
12506	ELU	-79,6		Fsd (kN)
12507	ELU	55,2	P22	159,2



## 8.2 Reações de apoio da laje lisa de 18cm

Reações de apoio laje lisa de 18cm				
Nó	Combinação	Rz (kN)		
12784	ELU	61,7		
12785	ELU	-94,6		
12786	ELU	177,1		Fsd (kN)
12787	ELU	20,8	P1	158,2
12904	ELU	-94,5		
12905	ELU	61,7		
12906	ELU	20,8		Fsd (kN)
12907	ELU	177,0	P2	158,2
12304	ELU	208,5		
12305	ELU	-41,4		
12306	ELU	199,1		Fsd (kN)
12307	ELU	-50,8	P3	308,7
12344	ELU	114,4		
12345	ELU	172,0		
12346	ELU	164,6		Fsd (kN)
12347	ELU	222,2	P4	666,4

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12704	ELU	172,0		
12705	ELU	114,4		
12706	ELU	222,2		Fsd (kN)
12707	ELU	164,5	P5	666,4
12744	ELU	-41,3		
12745	ELU	208,5		
12746	ELU	-50,8		Fsd (kN)
12747	ELU	199,0	P6	308,7
12224	ELU	203,5		
12225	ELU	-44,6		
12226	ELU	197,2		Fsd (kN)
12227	ELU	-50,9	P7	298,4
12264	ELU	168,3		
12265	ELU	218,5		
12266	ELU	151,9		Fsd (kN)
12267	ELU	202,1	P8	734,0

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12624	ELU	218,6		
12625	ELU	168,2		
12626	ELU	202,1		Fsd (kN)
12627	ELU	151,8	P9	734,0
12664	ELU	-44,5		
12665	ELU	203,4		
12666	ELU	-50,9		Fsd (kN)
12667	ELU	197,1	P10	298,4
12144	ELU	202,3		
12145	ELU	-48,0		
12146	ELU	199,7		Fsd (kN)
12147	ELU	-50,6	P11	296,7
12184	ELU	157,5		
12185	ELU	206,2		
12186	ELU	174,0		Fsd (kN)
12187	ELU	222,7	P12	753,7
12464	ELU	206,3		
12465	ELU	157,4		
12466	ELU	222,8		Fsd (kN)
12467	ELU	173,9	P13	753,6

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12584	ELU	-48,5		
12585	ELU	210,8		
12586	ELU	-52,3		Fsd (kN)
12587	ELU	193,4	P14	296,7
11984	ELU	221,0		
11985	ELU	-65,3		
11986	ELU	234,8		Fsd (kN)
11987	ELU	-51,5	P15	332,3
12024	ELU	92,8		
12025	ELU	264,7		
12026	ELU	29,2		Fsd (kN)
12027	ELU	201,1	P16	581,1
12424	ELU	264,8		
12425	ELU	92,7		
12426	ELU	201,2		Fsd (kN)
12427	ELU	29,1	P17	581,1
12544	ELU	-65,1		
12545	ELU	220,9		
12546	ELU	-51,4		Fsd (kN)
12547	ELU	234,7	P18	332,3

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12104	ELU	203,4		
12105	ELU	26,5		
12106	ELU	60,8		Fsd (kN)
12107	ELU	-116,1	P19	167,9
12064	ELU	71,3		
12065	ELU	191,5		
12066	ELU	-75,7		Fsd (kN)
12067	ELU	44,5	P20	224,9
12384	ELU	191,6		
12385	ELU	71,2		
12386	ELU	44,6		Fsd (kN)
12387	ELU	-75,8	P21	224,9
12504	ELU	26,7		
12505	ELU	203,3		
12506	ELU	-116,0		Fsd (kN)
12507	ELU	60,7	P22	167,9

### 8.3 Reações de apoio da laje lisa de 23cm

Reações de apoio laje lisa de 23cm				
Nó	Combinação	Rz (kN)		
12784	ELU	67,1		
12785	ELU	-72,6		
12786	ELU	166,1		Fsd (kN)
12787	ELU	26,4	P1	180,2
12904	ELU	-72,6		
12905	ELU	67,1		
12906	ELU	26,4		Fsd (kN)
12907	ELU	166,0	P2	180,2
12304	ELU	195,2		
12305	ELU	-1,6		
12306	ELU	182,9		Fsd (kN)
12307	ELU	-13,9	P3	355,9
12344	ELU	159,3		
12345	ELU	206,9		
12346	ELU	189,1		Fsd (kN)
12347	ELU	236,7	P4	785,2

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12704	ELU	206,9		
12705	ELU	159,3		
12706	ELU	236,7		Fsd (kN)
12707	ELU	189,1	P5	785,2
12744	ELU	-1,5		
12745	ELU	195,2		
12746	ELU	-13,9		Fsd (kN)
12747	ELU	182,9	P6	355,9
12224	ELU	186,4		
12225	ELU	-6,6		
12226	ELU	179,5		Fsd (kN)
12227	ELU	-13,5	P7	339,1
12264	ELU	204,1		
12265	ELU	244,4		
12266	ELU	189,7		Fsd (kN)
12267	ELU	230,0	P8	861,4

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12624	ELU	244,4		
12625	ELU	204,1		
12626	ELU	230,0		Fsd (kN)
12627	ELU	189,6	P9	861,4
12664	ELU	-6,5		
12665	ELU	186,4		
12666	ELU	-13,5		Fsd (kN)
12667	ELU	179,4	P10	339,1
12144	ELU	185,8		
12145	ELU	-9,6		
12146	ELU	181,3		Fsd (kN)
12147	ELU	-14,1	P11	336,7
12184	ELU	198,9		
12185	ELU	238,5		
12186	ELU	208,8		Fsd (kN)
12187	ELU	248,5	P12	887,9
12464	ELU	238,6		
12465	ELU	198,8		
12466	ELU	248,5		Fsd (kN)
12467	ELU	208,7	P13	887,9

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12584	ELU	-8,7		
12585	ELU	193,8		
12586	ELU	-16,8		Fsd (kN)
12587	ELU	175,1	P14	336,7
11984	ELU	207,2		
11985	ELU	-23,1		
11986	ELU	220,1		Fsd (kN)
11987	ELU	-10,3	P15	387,2
12024	ELU	124,1		
12025	ELU	269,3		
12026	ELU	70,6		Fsd (kN)
12027	ELU	215,8	P16	673,0
12424	ELU	269,4		
12425	ELU	124,0		
12426	ELU	215,9		Fsd (kN)
12427	ELU	70,5	P17	673,0
12544	ELU	-23,0		
12545	ELU	207,1		
12546	ELU	-10,2		Fsd (kN)
12547	ELU	219,9	P18	387,2

Nó	Combinação	Rz (kN)		
12104	ELU	192,6		
12105	ELU	34,3		
12106	ELU	64,1		Fsd (kN)
12107	ELU	-94,2	P19	190,0
12064	ELU	71,4		
12065	ELU	183,3		
12066	ELU	-55,8		Fsd (kN)
12067	ELU	56,0	P20	248,2
12384	ELU	183,4		
12385	ELU	71,3		
12386	ELU	56,1		Fsd (kN)
12387	ELU	-55,9	P21	248,2
12504	ELU	34,4		
12505	ELU	192,5		
12506	ELU	-94,2		Fsd (kN)
12507	ELU	64,0	P22	190,0